



**Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC**

**Centro Tecnológico**

**Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

**Estudo do Escoamento Imiscível Água/Óleo Mediante Experimentação em  
Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD**

**Gabriel Cassemiro Mariano**

Florianópolis - SC, 2008.

**Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC**  
**Centro Tecnológico**  
**Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos**

**Estudo do Escoamento Imiscível Água/Óleo Mediante Experimentação em  
Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós Graduação em Engenharia Química,  
Centro de Tecnológico da Universidade  
Federal de Santa Catarina para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Química

**Gabriel Cassemiro Mariano**

Florianópolis - SC, 2008.

# **Estudo do Escoamento Imiscível Água/Óleo Mediante Experimentação em Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD**

**GABRIEL CASSEMIRO MARIANO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

---

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr. Sc.  
**Orientador**

---

Prof. Mara Gabriela Novy Quadri, Dr. Sc.  
**Co-Orientador**

---

Prof. Agenor Junior, Dr. Eng.  
**Coordenador do CPGENQ**

## **Banca examinadora:**

---

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr. Sc.  
**Presidente**

---

Prof. Leonel Teixeira Pinto, Dr. Sc.

---

Prof. Mara Gabriela Novy Quadri, Dr. Sc.

---

Prof. Nestor Roqueiro, Dr. Sc.

---

Prof. Ricardo Machado, Dr. Sc.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me dar a vida e por colocar pessoas boas, importantes e honestas, em meu caminho.

Aos meus pais, irmãos e familiares, que mesmo tão distantes, acompanharam e incentivaram sendo de fundamental importância para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Drs. Marinho Bastos Quadri, Mara Gabriela Novy Quadri, Ricardo Machado, pela valiosa orientação e incentivo que foram importantes para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos companheiros de pesquisa especialmente ao Dr. Sc. Carlos Alberto Claumann, Dr. Sc. Toni Jefferson Lopes e Eng. Ronny Amarildo Caytano Terán, por passar dicas tão importantes durante a realização do trabalho.

“Tudo tem seu tempo e até certas manifestações mais  
vigorosas e originais entram em voga ou saem de moda.  
Mas a sabedoria tem uma vantagem: é eterna.”  
*Baltasar Gracián*

## RESUMO

O estudo de sistemas água-óleo é de fundamental importância para diversos processos industriais. Procedimentos como a recuperação secundária de petróleo e o bombeamento de óleos de viscosidade elevada, mediante a injeção conjunta de água, exemplificam situações na indústria petrolífera em que o comportamento da interface água-óleo traz importantes consequências para a eficiência da produção. Também nos casos de vazamentos a partir de dutos submersos, e na contaminação de águas subterrâneas pela proximidade de uma fase óleo, os aspectos fenomenológicos desse sistema imiscível devem ser conhecidos a fim de que medidas adequadas de remediação e quantificação dos danos ambientais possam ser postos em prática.

O fato de o petróleo ser, de um modo geral, mais viscoso e menos denso que a água faz com que, no escoamento simultâneo desses dois fluidos, a água apresente a tendência de se deslocar com maior velocidade em relação ao óleo. Como consequência, dependendo das diferenças de viscosidades e densidades entre os dois fluidos, além das forças de tensão interfacial, pode vir a ocorrer o fenômeno de digitação viscosa. Assim, no deslocamento de óleo por injeção de água, *fingers* gerados a partir da fase água podem penetrar na fase óleo, ocasionando um retardamento no deslocamento do óleo com saída antecipada da água, o que representa um prejuízo para a operação.

Uma ferramenta de simulação fluidodinâmica, apta a descrever corretamente os fenômenos e padrões de escoamento de um sistema água-óleo, sob diferentes condições operacionais, pode se constituir em notável instrumento para aprofundar conhecimentos da fenomenologia envolvida e, também, gerar elementos de inovação tecnológica para as diferentes aplicações.

Neste trabalho, explora-se o comportamento de um sistema água-óleo através de um modelo tridimensional de uma célula de Hele-Shaw. Esse modelo reproduz uma célula real carregada com água e óleo com dimensões de 100 cm de comprimento por 30 cm de largura, com espaçamento típico entre as placas de 0,10 cm. Uma série de ensaios computacionais foram realizados para validar o modelo, além dos critérios usuais de estabilidade numérica e fechamento de balanços.

O modelo computacional da célula de Hele-Shaw, possibilitou a observação do comportamento da interface. As propriedades dos fluídos (densidade, viscosidade e tensão superficial) e fenômenos físicos (temperatura, capilaridade, força gravitacional e velocidade de injeção do fluído) influenciaram diretamente na resposta do sistema. Através de simulações computacionais foi possível estudar individualmente a importância e efeito que cada fator exerce sobre o sistema, desde as propriedades dos fluidos até as condições de contorno aplicadas, foi possível também, identificar o grau de atuação das forças interfaciais, gravitacional e do arraste viscoso, levando ao surgimento do fenômeno de digitação viscosa. Comprovou-se que o aumento das forças capilares costuma levar a um aumento da instabilidade, com conseqüente aumento no número de *fingers* desenvolvidos, aumentando a área de óleo em atraso e reduzindo a eficiência do processo.

**Palavras-chave:** escoamento imiscível, célula de *Hele-Shaw*, digitação viscosa, água-óleo, *finger*

## **ABSTRACT**

The study of systems water-oil is of fundamental importance for several industrial processes. Procedures as the secondary recovery of petroleum and the pumping of oils of high viscosity, by the united injection of water, exemplify situations in the industry of petroleum where the behavior of the interface water-oil brings important consequences for the efficiency of the production. Also in the cases where happen leaks starting from ducts submerged, and in cases of contamination of underground waters for the proximity of a phase oil, the aspects of phenomena of that system immiscible should be known so that appropriate measures of recovery and quantification of the environmental damages can be put into practice.

The fact of the petroleum to be, in general, more viscous and less dense than the water does with that, in the simultaneous drainage of those two fluids, the water presents the tendency of moving with larger speed in relation to the oil. As consequence, depending on the differences of viscosities and densities among the two fluids, besides the forces of interface tension, it can come to happen the phenomenon of viscous fingering. Like this, in the oil displacement with injection of water, fingers generated starting from the phase water can penetrate in the phase oil, causing retardation in the displacement of the oil with premature exit of the water, what represents damage for the operation.

A tool CFD – Computational Fluid Dynamics, capable to describe the phenomena and patterns of drainage of a system water-oil correctly, under different operational conditions, it can be constituted in notable instrument to deepen knowledge of the involved phenomenology and, also, to generate elements of technological innovation for the different applications. In this work, the behavior of a system water-oil is explored through a 3D model of a cell of



Hele-Shaw. That model reproduces a real cell loaded with water and oil with dimensions of 100 cm of length for 30 cm of width, with typical spacing among the plates of 0,10 cm. A series of rehearsals computation was accomplished to validate the model, besides the usual criteria of numeric stability and closing of swingings.

The computational model of the cell of Hele-Shaw, made possible the observation of the behavior of the interface. The properties of those flowed (density, viscosity and tension surface) and physical (temperature, capillarity, forces gravitational and speed of injection of the flowed) phenomena influenced directly in the answer of the system. Through computational simulations it was possible to study the importance and effect that each factor exercises on the system individually, from the properties of the fluids to the outline conditions applied, it was possible also, to identify the degree of performance of the interface forces, gravitational and of the it drags viscous, taking to the appearance of the phenomenon of viscous fingering. To prove that the increase of the capillary forces take the an increase of the instability, with consequent increase in the number of developed fingers, increasing the oil area in delay and reducing the efficiency of the process.

**Key Words:** immiscible flow, cell of Hele-Shaw, viscous fingering, water-oil, finger

# SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>NOMECLATURAS</b> .....	xv
<b>1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO</b> .....	1
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 Escoamentos Imiscíveis .....	3
2.1.1 - Propriedades Físicas .....	6
2.1.2 - Tensoativos .....	9
2.2 - Sistema de interface água/óleo .....	12
2.2.1 - <i>Fingers</i> .....	17
2.3 – Célula de Hele - Shaw .....	20
<b>3 - MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	25
3.1 - Estudo Experimental .....	25
3.1.1 - Planejamento Experimental .....	25
3.1.2 - Material .....	28
3.1.3 - Métodos .....	28
3.1.4 - Tratamento de imagem .....	31
3.2 - Estudo Computacional .....	33
<b>4 - MODELAGEM MATEMÁTICA</b> .....	43
4.1 - Método Numérico .....	44
4.1.1 - Fluidodinâmica Computacional (CFD) .....	45
4.2 - Modelo .....	49
4.2.1 - Equação de <i>Hagen - Poiseuille</i> .....	51
4.2.2 - Condição Inicial e Condição de Contorno .....	52
4.3 - Erro Numérico .....	55

<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	57
5.1 - Resultados Experimentais	57
5.2 - Resultados Computacionais	62
<b>6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	76
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	78
<b>ANEXOS – ARTIGOS DESENVOLVIDOS</b>	83

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1</b> - Regimes de escoamento para sistemas óleo e água	5
<b>Figura 2</b> - Esquema simplificado da interface de escoamento em um duto quando dois líquidos imiscíveis são submetidos ao escoamento: (a) situação ideal - interface plana; (b) situação real - interface convexa; (c) situação real - interface côncava	7
<b>Figura 3</b> - Superfície molhável por : A) água ( $\Theta < 90^\circ$ ) e B) óleo ( $\Theta > 90^\circ$ )	8
<b>Figura 4</b> - Organização de uma micela segundo <i>Stigter</i>	10
<b>Figura 5</b> - Estrutura sedimentar do reservatório de petróleo	12
<b>Figura 6</b> - Tipos de exploração de poços de petróleo - Horizontal e Vertical	13
<b>Figura 7</b> - A - relação vazão de óleo e água na fase de exploração primária e secundária do petróleo, 7 B - perfil do vazão de óleo produzido com o aumento de injeção nas fases de exploração	16
<b>Figura 8</b> - Digitação viscosa ( <i>finger</i> )	17
<b>Figura 9</b> - A- Navio naufragando; B - Migração Advectiva convés de navio naufragado (Fonte: <i>BBC Brasil</i> )	19
<b>Figura 10</b> - Perfil bidimensional de um sistema de remorção de fase livre acomodada sobre lençol freático	19
<b>Figura 11</b> - A - Perfil de escoamento em um tubo, canaleta ou placas estáticas; B - Célula de Hele-Shaw.	21
<b>Figura 12</b> - Três seqüências de digitação a partir da perturbação da interface	22
<b>Figura 13</b> - A - membrana circular em repouso; B - membrana circular perturbada	24
<b>Figura 14</b> - Aparato experimental Célula de <i>Hele-Shaw</i> .	27
<b>Figura 15</b> - A - Experimento - teste 1 de perfil e eficiência de chicana; B - Experimento - teste 2 de perfil e eficiência de chicana.	29
<b>Figura 16</b> - Configuração da melhor eficiência da chicana quanto estabilização fluxo x distância percorrida	30

<b>Figura 17</b> - Grampo de aço apoiado sobre peças de madeira para fixação das placas	30
<b>Figura 18</b> - Célula de Hele Shaw. (a) sistema inclinado preparado para aquisição fotográfica	32
<b>Figura 19</b> - Esquema de tratamento e definição de região interfacial estudada	32
<b>Figura 20</b> – Célula de Hele-Shaw segundo a montagem experimental e ao lado uma representação do modelo computacional	33
<b>Figura 21</b> - Representação da malha hexaédrica estruturada	35
<b>Figura 22</b> - Interface gráfica definição de propriedades interfaciais <i>Ansys CFX 11.0</i>	36
<b>Figura 23</b> - Perfil de pressão hidrostática relativa às colunas de óleo e água na Célula de Hele-Shaw	38
<b>Figura 24</b> - A - Representação gráfica do modelo computacional onde o baixo número de pontos discretizados não altera a tendência da resposta; B - Representação gráfica de modelo computacional com alto erro numérico devido ao baixo número de pontos discretizados	44
<b>Figura 25</b> - Localização dos pontos da função de interpolação.	47
<b>Figura 26</b> - Representação plana do ângulo de contato e força de empuxo entre dois fluidos	53
<b>Figura 27</b> - Foto com detalhes dos <i>fingers</i> e correspondente digitação viscosa	57
<b>Figura 28</b> - No bombeamento a largura na base dos <i>fingers</i> de água é sempre maior do que nos <i>fingers</i> de óleo	59
<b>Figura 29</b> - Valores observados x valores preditos pelo modelo	60
<b>Figura 30</b> - Resposta do sistema para os quatro efeitos testados	61
<b>Figura 31</b> - Área de óleo em atraso em função da Concentração de <i>NaCl</i> e Distância entre as Placas	61
<b>Figura 32</b> - Formulário onde se vê a entrada de parâmetros relacionados com a condição de parede e adesividade	62
<b>Figura 33</b> - Esquema mostrando o ângulo de contato entre a interface dos fluidos e as placas da célula	63
<b>Figura 34</b> - Representação 3D da interface água/óleo na célula de Hele-	64

Shaw para um escoamento instável	
<b>Figura 35</b> - Um resultado de simulação com baixo valor para a tensão interfacial	65
<b>Figura 36</b> - A - Definição da interface com tensão = 0,126 N/m; B - com tensão = 0,095 N/m	65
<b>Figura 37</b> - Semelhança de características físicas entre experimento e simulação	66
<b>Figura 38</b> - Competitividade entre fingers; A - Visão crítica sobre figura de <i>fingers</i> Mawhorty (1986), apresentação da competitividade; B - Competitividade observada por simulação computacional	67
<b>Figura 39</b> - Comparativo entre padrões de um par de fingers obtidos experimentalmente e por simulação computacional	68
<b>Figura 40</b> - Resposta para simulação 1 de 2 experimentos com condições idênticas, tempos de 3,5 e 6,6 s	69
<b>Figura 41</b> - Resposta para simulação 2 de 2 experimentos com condições idênticas, tempos de 3,5 e 6,6 s	69
<b>Figura 42</b> - Perturbação da interface a um momento inicial de simulação, A - passo de tempo de 0,0005; B - passo de tempo de 0,0001	71
<b>Figura 43</b> - Teste de repetibilidade, passo de tempo 0,0001s; tensão interfacial 0,10 N/m; tempo de simulação 4 segundos. A - Teste de repetibilidade simulação 1; B - Teste de repetibilidade simulação 2	72
<b>Figura 44</b> - Perturbação da interface, A - para passo de 0,001s a um tempo de 7,4s; B - para passo de 0,0001s ao tempo correspondente a 6,4	73
<b>Figura 45</b> - Esquema do cálculo da área de óleo em atraso para o ensaio 2 da Tabela 4.	74
<b>Figura 46</b> - Esquema do cálculo da área de óleo em atraso para a simulação do ensaio 2 da Tabela 4	74

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1</b> - Fatores e níveis analisados.	26
<b>Tabela 2</b> - Níveis de velocidade de injeção de água através do orifício circular e da seção transversal perpendicular ao escoamento.	36
<b>Tabela 3</b> - Matriz do Planejamento fatorial parcial $2_{IV}^{4-1}$ com suas respectivas respostas.	58
<b>Tabela 4</b> - Efeitos estimados e respectivos índices estatísticos, em negrito o mais significativo.	59
<b>Tabela 5</b> - ANOVA da área em atraso.	60

## NOMECLATURA

<i>CFD</i>	Estudo Computacional de sistemas Fluido Dinâmicos
$\gamma$	Tensão superficial ou interfacial
$\gamma_{AO}$	Tensão interfacial água/óleo
<i>W</i>	Trabalho
<i>A</i>	Área
<i>b</i>	Espessura entre placas
$\Gamma$	Área transversal da molécula / termo difusivo
<i>R</i>	Constante universal dos gases
<i>T</i>	Temperatura
<i>cp</i>	CentPoise
<i>k</i>	Número de ondas da perturbação
<i>g</i>	Aceleração gravitacional
<i>step</i>	Função degrau
<i>sin</i>	Seno
$\vec{V}$	Velocidade
<i>EVA</i>	Etil Vinil Acetato – ‘borracha’
<i>HOT</i>	Representação termo de truncamento
<i>P</i>	Pressão
<i>step</i>	Função degrau aplicada a fração volumétrica
<i>UpH</i>	Altura da coluna de água que determina a interface entre frações volumétricas
<i>DenOil</i>	Densidade do óleo
<i>DenWater</i>	Densidade da água
<i>UpHF</i>	Altura da coluna de óleo
<i>UpH</i>	Altura da coluna de água
<i>UpVFWater</i>	Fração volumétrica da água 1-UpVFOil
<i>min</i>	Função de mínimo múltiplo comum, aplicada às frações volumétricas de modo a fornecer a pressão exercida pelas colunas de óleo e água



$f_i$	Forças que atuam no corpo (tais como a gravidade)
$P_c$	Pressão capilar na interface entre os fluidos.
$n_{\alpha\beta}$	Vetor normal da interface apontando do fluido primário para o fluido secundário
$F_{\alpha\beta}$	Força superficial fluido mais viscoso
$E_s$	Erro de solução
$f_{exact}$	É a solução exata
$f_{numeric}$	É a solução numérica

## 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Grande parte dos trabalhos, destinados ao estudo dos fenômenos interfaciais e seus efeitos no deslocamento imiscível de um fluido por outro, baseiam-se em sistemas reais encontrados na área de recuperação secundária e terciária de jazidas petrolíferas, onde água é injetada para expulsar o óleo remanescente nos poros das rochas. Verifica-se, também, que os fenômenos interfaciais decorrentes do sistema de deslocamento de óleo por injeção de água, descritos neste trabalho, apresentam estreita relação ou identidade com fenômenos decorrentes de sistemas de inversão de fases, como vazamento de dutos submersos e remediação de contaminações ambientais.

A indústria de petróleo é a principal interessada em estudos relacionados ao deslocamento imiscível de um fluido por outro. Esse sistema pode ser observado quando se trata de: recuperação primária e secundária, ou seja, elevação natural e artificial do óleo a partir dos poços; e, bombeamento através de dutos, de óleos de viscosidade elevada mediante a injeção conjunta de água (*core-flow*). A eficiência do deslocamento dos fluidos na fase de recuperação de jazidas de petróleo é consequência direta dos fenômenos interfaciais característicos de sistemas água-óleo. Não se deve esquecer do fenômeno de inversão de fases, como acontece, por exemplo, no caso de vazamento de óleo a partir de dutos submersos, cujo estudo é importante para a quantificação de volumes vazados e definição de estratégias de remediação.

O caso da injeção de água para recuperação secundária se constitui em método tradicional e amplamente conhecido. A água é injetada em um reservatório de óleo, de modo a pressurizá-lo, aumentando a recuperação após a etapa inicial, chamada de recuperação primária. Estudos afirmam que nesta etapa, a recuperação do óleo chega a 15-30% do óleo original. O principal resíduo ligado à atividade de Extração do Petróleo é a água que, quase sempre, está associada ao óleo produzido. O fato de o óleo ser, de um modo geral, mais viscoso e mais leve que a água, faz com que, no escoamento simultâneo destes dois fluidos, a água tenda a se deslocar numa velocidade mais elevada em relação ao óleo no seu trajeto em direção aos poços produtores. Como consequência, e a depender do contraste de viscosidade entre os dois fluidos, não é raro ocorrer o fenômeno de digitação viscosa, gerando *fingers*, que são responsáveis pela irrupção da água nos poços produtores, comprometendo, assim, a vazão de óleo produzido e, com ela, a recuperação final (SILVIA, 2004).

---

Considerando ainda, o tamanho e profundidade do reservatório, a irrupção de água no poço produtor de petróleo pode destruir todo o projeto de exploração de petróleo ou, em consideração menos desastrosa, promover o abandono do poço de exploração. O aumento do fluido água compromete a rentabilidade do reservatório, aumentando o tempo e custos operacionais nas etapas primárias de processo, exploração e separação.

O presente trabalho traz conceitos básicos que, teoricamente, são importantes para o entendimento do comportamento da interface existente em sistemas de escoamentos imiscíveis; podem-se destacar as modalidades de recuperação e aumento de produtividade dos poços; lembra-se, também, a importância desses fenômenos em vazamento de petróleo a partir de dutos submarinos, assim como, na contaminação de águas subterrâneas pela proximidade de uma fase óleo.

Estudos teóricos e experimentais sobre propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade e tensão superficial), e fenômenos físicos envolvidos no sistema (como capilaridade, padrões de escoamento e papel da força gravitacional) podem contribuir para o entendimento do comportamento da interface água/óleo, facilitando análises e previsões relacionadas ao sistema. Estudos de simulação matemática em CFD buscam representar computacionalmente o sistema numa abordagem 3D. O estudo visa desenvolver um modelo matemático que considere as propriedades dos fluidos, assim como os fenômenos físicos presentes no sistema e observados experimentalmente.

Assim, o presente trabalho objetiva de início uma análise experimental do comportamento da interface água-óleo, bem como dos fatores que levam ao aparecimento do fenômeno de digitação viscosa, e, em um segundo momento, desenvolver um estudo computacional que retrate o sistema realisticamente, segundo os ensaios realizados no aparato experimental (Hele-Shaw). Deste modo, almeja-se obter conhecimentos e desenvolver ferramentas que contribuam para a otimização e solução de problemas relacionados aos escoamentos imiscíveis e ao aparecimento do fenômeno de digitação viscosa, com foco principal para as operações de exploração e produção da indústria do petróleo.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - ESCOAMENTOS IMISCÍVEIS

Muitos reservatórios petrolíferos não se encontram saturados com óleo em toda sua espessura, mas possuem, além da zona de óleo onde a saturação de água é mínima (saturação irreduzível), zona de transição e zona totalmente saturada com água. Nessa faixa de transição denominada contato óleo e água são realizados vários estudos, visando promover a estabilização dos fluidos. Este fato não ocorre somente com sistemas óleo e água. Ao contrário, ocorre em todos fluidos que não se misturam sobre condições de temperatura e pressão aplicadas no escoamento, denominados líquidos imiscíveis.

Os escoamentos imiscíveis podem ocorrer em sistemas fluidos bifásicos, trifásicos com fases distintas ou não, como gás – líquido, líquido – líquido. O presente trabalho visa o estudo de um sistema bifásico, líquido – líquido, sendo os fluidos água e óleo. As principais propriedades físicas consideradas nos estudos de sistemas água e óleo são, viscosidade, densidade, tensão superficial e a molhabilidade dos líquidos. Essas propriedades podem apresentar relações importantes com temperatura e pressão do meio a que estão expostos.

A água e o óleo, quando submetidos a processo de escoamento, formam um sistema heterogêneo composto por duas fases que apresenta entre elas uma fronteira chamada de interface, que é a superfície de separação entre as duas fases. As interfaces são zonas anisotrópicas, em que as propriedades estruturais e dinâmicas são muito diferentes das propriedades do seio das fases. A espessura da interface deve ser bem definida atingindo espessuras de poucos milímetros ou mesmo micron. A disposição dos fluidos depende do tipo de escoamento estudado (SANTOS, 2003).

Diferentes configurações para escoamento de dois líquidos imiscíveis são estudadas. Na literatura, os regimes destes sistemas são classificados em dois grandes grupos, dependendo de qual fluido constitui a fase contínua, aparecendo assim os regimes baseados em óleo (*oil based*) e os baseados em água (*water based*) onde as fases contínuas são o óleo ou a água, respectivamente. No trabalho de TRALLERO *et al.* (1996) a classificação dos regimes é baseada em dois fenômenos; fase contínua e a configuração estratificada ou dispersa do escoamento. Surgem assim, padrões como dispersão de óleo em água, dispersão de água em óleo, estratificado e estratificado com mistura na interface. Porém, ARIRACHAKARAN *et al*

(1989) apresentam uma classificação mais interessante e abrangente que se baseia fundamentalmente nas configurações geométricas adotadas pelo escoamento, já que a modelagem matemática é baseada em tais configurações. Feita a modelagem para um escoamento, tomando como exemplo um escoamento do tipo disperso, pode variar facilmente as características da fase contínua, variando-se as propriedades dos fluidos, que são dados de entrada do modelo.

Na classificação, mostrada na Figura 1, aparecem seis padrões, descritos conforme tópicos abaixo:

- Escoamento de superfície livre: as fases são totalmente imiscíveis e não ficam dispersas pode-se dizer que existem frações volumétricas inteiras e uma superfície de acoplamento dos fluídos, fazendo essa separação das duas fases.
- Escoamento estratificado: pode ter mistura na interface, colocando-se a fase menos densa na parte superior do duto.
- Escoamento em regime misturado: tem uma dispersão (óleo em água ou água em óleo) na parte de cima ou de baixo do duto dependendo da densidade relativa da fase contínua e uma porção do duto onde se tem uma fase pura (fase livre).
- Escoamento anular: similar ao escoamento em regime misturado, onde tanto no centro como no anel, podem-se ter fases dispersas ou puras.
- Escoamento em regime intermitente: as fases ocupam o duto alternativamente podendo também ser puras ou dispersões.
- Escoamento totalmente disperso: chamado também homogeneizado, podendo ter dispersões de óleo em água ou água em óleo.

Esta classificação inclui a apresentada por TRALLERO *et al.* (1996), porém contempla um número maior de configurações geométricas as quais são um fator determinante na modelagem do escoamento desses sistemas.

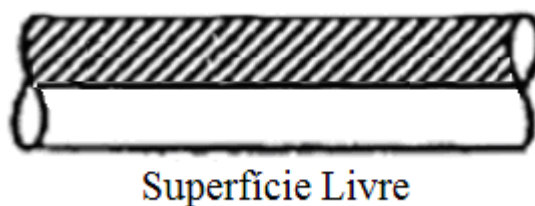




Figura 1 – Regimes de escoamento para sistemas óleo e água (Fonte: TRALLERO et al. 1996)

Quando o escoamento em regime estratificado, tomado como exemplo água - óleo é submetido a uma situação de equilíbrio, onde as pressões internas e externas ao líquido são iguais, uma interface plana deve ser observada, pois os efeitos gravitacionais superam os efeitos da tensão superficial. A fenomenologia física e modelagem matemática desta interface é o objeto de estudo do presente trabalho.

### 2.1.1 - Propriedades físicas

Segundo SHAW (1975), a tensão superficial é o excesso de energia livre por unidade de área, criada por forças coesivas das moléculas na superfície de um líquido atuando para o interior. Ou seja, a tensão superficial e a energia livre de superfície podem ser definidas como o trabalho necessário para aumentar ou reduzir a superfície em uma unidade de área, por um processo exotérmico e reversível. Em resumo, a medida da tendência da superfície a encolher, por unidade de comprimento, é a tensão superficial. Ou seja, a variação de energia livre de um sistema, por unidade de área de superfície desse sistema, sob condições de pressão e temperatura.

A tensão superficial apresenta uma relação linear inversa à temperatura de acordo com o Princípio de *Lé Chatelier*. Este princípio associa a necessidade da realização de um trabalho para aumentar a área superficial de um líquido, conforme a Equação 1. Em outras palavras, a tensão superficial expressa a oposição do líquido em sofrer esta deformação. O trabalho ( $dW$ ) necessário para deformar a área superficial de um líquido de " $dA$ " é dado através da seguinte relação:

$$dW = \gamma dA \quad (1)$$

onde:

- $\gamma \rightarrow$  tensão superficial (resistência da película por unidade de comprimento)

A tensão superficial ainda apresenta uma relação de proporcionalidade com a pressão, ou seja, o aumento da pressão do sistema leva a um aumento da tensão superficial do líquido. As medidas da tensão superficial são normalmente calculadas tendo o ar como referência (interface líquido - ar) conforme determinações da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para escoamentos de fluidos imiscíveis a forma inicial da interface líquido - líquido tem grande influência sobre as propriedades deste escoamento, principalmente se este for estratificado em um duto circular. Em sistema líquido - líquido, com pequena diferença entre as densidades ou em sistemas com gravidade reduzida (mesmo com grande diferença de densidade), os fenômenos superficiais tendem a ser dominantes, gerando uma interface curva entre os dois líquidos, principalmente se a razão entre as viscosidades for elevada (BRAUNER *et al.* 1996).

Portanto dependendo das propriedades físicas dos líquidos, da molhabilidade do líquido no sólido, das dimensões geométricas e da fração volumétrica dos líquidos (*holdup*), pode gerar uma interface líquido-líquido plana, côncava ou convexa conforme Figura 2 (BRAUNER *et al.*, 1998).

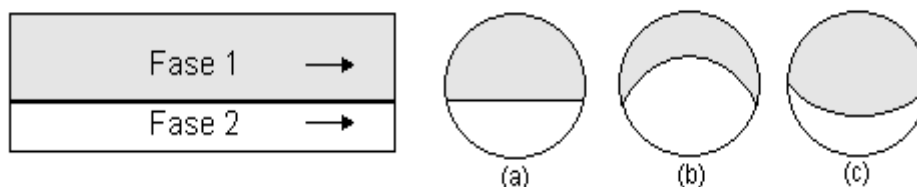


Figura 2 – Esquema simplificado da interface de escoamento em um duto quando dois líquidos imiscíveis são submetidos ao escoamento: (a) situação ideal – interface plana; (b) situação real – interface convexa; (c) situação real – interface côncava.

A concavidade ou convexidade da interface depende principalmente da relação entre as propriedades de molhabilidade dos líquidos com a superfície sólida. (BRAUNER, *et al.*, 1998).

Segundo CRAIG (1971), a molhabilidade é definida como uma tendência do fluido se espalhar ou aderir sobre a superfície sólida na presença de outro fluido, sendo os dois fluidos, por exemplo, óleo e água, a informação sobre molhabilidade é fundamental para se entender os problemas com fluxo multifásico, desde, como exemplo, a migração de óleo na rocha de origem até os mecanismos de produção primária e os processos de recuperação de óleo pesado. NAKAE *et al.* (1998) mostraram, através de modelos matemáticos e de medidas de ângulo de contato, que a molhabilidade é influenciada pela rugosidade da superfície.

As medidas de ângulo de contato podem ser usadas para estudar as interações água e óleo com a superfície sólida, pois o ângulo de contato reflete a afinidade relativa entre a superfície sólida e as duas fases fluidas imiscíveis. Quando dois fluidos imiscíveis estão em contato com a superfície sólida, a configuração de equilíbrio das duas fases fluidas depende dos valores relativos da tensão interfacial entre cada par das três fases. Esta relação pode ser mostrada pela equação de Young que relaciona o ângulo de contato ( $\Theta$ ), medido na fase aquosa por convenção, e essas tensões, conforme equação (ZISMAN, 1964):

$$\gamma_{oa} \cos \theta = \gamma_{sa} - \gamma_{os} \quad (2)$$

São consideradas como superfícies molháveis pela água, superfícies neutras e superfícies molháveis pelo óleo, aquelas que apresentam ângulo de contato menor que 90°,



igual a  $90^\circ$  e maior do que  $90^\circ$ , respectivamente, uma vez que o ângulo de contato é medido, por convenção da literatura, na fase aquosa. A Figura 3 demonstra a região de medição do ângulo e as medições que apresentam a molhabilidade por água e molhabilidade por óleo (SHAW, 1992).

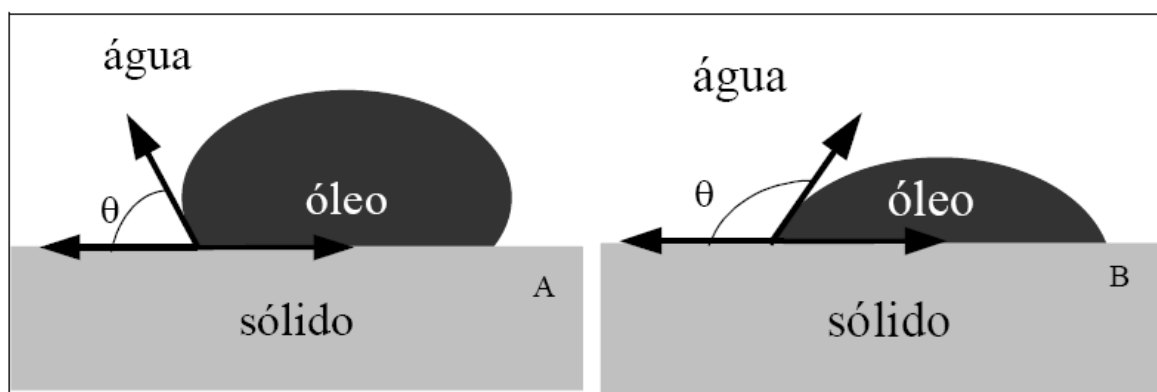


Figura 3 – Superfície molhável por : A) água ( $\Theta < 90^\circ$ ) e B) óleo ( $\Theta > 90^\circ$ ) (Fonte: SHAW, 1992)

Quanto menor for o ângulo de contato mais molhável pela água será a superfície sólida, então, mais estável será o filme lubrificante de água no transporte de óleo pesado. Assim, pelo método *core-flow*, injeta-se um fluido, geralmente água ou polímeros, com o objetivo de formar uma capa ao redor do fluido viscoso, diminuindo o atrito do óleo com a parede da tubulação, reduzindo a molhabilidade do óleo e facilitando o escoamento do óleo no duto.

Como propriedade importante para o entendimento de escoamentos de óleo – água, principalmente no que diz respeito a exploração de petróleo, a capilaridade tem notável importância.

A ação capilar dos líquidos se deve à tendência dos líquidos de subir pelas paredes de tubos capilares (tubos muito finos); essa tendência é considerada uma consequência da tensão superficial. Considere um tubo capilar imerso em água ou em um líquido com tendência a aderir às paredes do capilar de vidro. A energia é menor quando um filme líquido cobre tanto vidro quanto possível. À medida que o líquido sobe pelo lado interno da parede ele tem o efeito de curvar a superfície do líquido dentro do tubo. Essa curvatura faz com que a pressão logo abaixo do menisco curvo seja menor do que a pressão atmosférica por aproximadamente  $2\gamma/r$ , com  $r$  igual ao raio do tubo, considerando uma superfície hemisférica. A pressão imediatamente sob a superfície chata do lado de fora do tubo é  $p$  ou pressão atmosférica, mas dentro do tubo sob a superfície curva é de apenas  $P - 2\gamma/r$ . O excesso de pressão externa pressiona o líquido para cima no tubo até que o equilíbrio hidrostático seja atingido. A Equação 3 demonstra que a pressão exercida por uma coluna de líquido de densidade  $d$  e altura  $h$  é  $P =$

$\rho \cdot g \cdot h$ , em gravidade  $g$ . Essa pressão hidrostática é igual a diferença de pressão  $\Delta P = 2 \gamma / r$  no equilíbrio das forças atuando na coluna de líquido. Portanto, a altura da coluna no equilíbrio é obtida igualando-se  $2 \gamma / r = \rho \cdot g \cdot h$ , o que resulta em:

$$h = \frac{(2\gamma)}{(\rho \cdot g \cdot r)} \quad (3)$$

Pode-se observar que a tensão superficial apresenta uma relação direta com as propriedades individual e interfacial dos fluidos.

### 2.1.2 - Tensoativos

Os tensoativos são muito utilizados quando se deseja alterar propriedades dos fluidos, eles podem ser usados para alterar propriedades como, tensão superficial, molhabilidade e viscosidade dos líquidos. Este composto químico pode ser usado para controlar o processo de recuperação de um reservatório de petróleo, objetivando o aumento da eficiência do processo, é também usado como aditivos em combustíveis, redutor de fricção. (TURNER, 1992). Tensoativos são compostos anfífilos, orgânicos ou organometálicos que formam colóides ou micelas em solução. Substâncias anfífilas ou anfílicas são moléculas possuidoras de regiões distintas e características como hidrofóbicas e hidrofílicas. Como nestas substâncias apenas a polaridade das diferentes regiões variam enormemente, as mesmas são também denominadas de moléculas anfipáticas, heteropolares ou polar – não polares (ROSEN, 1978).

Uma das características comum a todos os surfactantes ou tensoativos é a capacidade de formar agregados em solução aquosa a partir de uma determinada concentração. Estes agregados são denominados micelas. A principal razão que leva os monômeros de surfactante a se associarem sobre a forma de micelas é a diminuição da área de contato entre as cadeias hidrocarbônicas do surfactante e a água. A formação do agregado, porém, leva o surfactante a uma situação onde os grupos hidrofílicos (cabeças) estão muito próximos, gerando uma repulsão eletrostática que se opõe ao processo de micelização. Assim os contra íons desempenham um papel fundamental: quando em concentração suficiente, blindam a carga do agregado, diminuindo o potencial elétrico e a repulsão entre as cabeças dos monômeros (HUMERES *et al*, 1999).

Diversos são os modelos que tentam ilustrar a forma e comportamento de uma micela. Dentre os mais aceitos, destaca-se o modelo de *Stigter* apresentado na Figura 4. Os monômeros, segundo *Stigter*, se organizariam em forma esférica, onde todas as porções

hidrofóbicas do surfactante estariam voltadas para o centro, formando o núcleo, e os grupamentos hidrofílicos na superfície da esfera, formando a interface com a água.

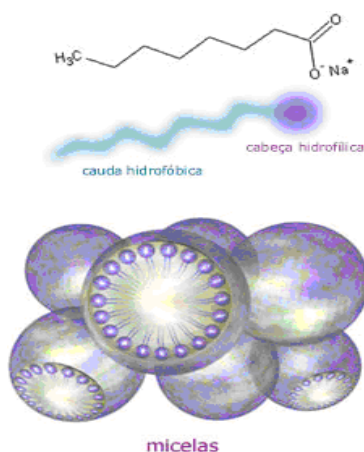


Figura 4 – Organização de uma micela segundo *Stigter*. (Fonte: HUMERES *et al*, 1999)

Os surfactantes iônicos possuem dois tipos de comportamento em solução aquosa. Abaixo da CMC (Concentração micelar crítica) os monômeros comportam-se com eletrólito forte. Após a micelização, cada monômero adicionado contribui para a formação de micelas. A micela não é completamente ionizada, apenas uma fração  $\alpha$  de íons fica livre na solução este é, portanto, o comportamento esperado para um eletrólito fraco. Esta mudança de propriedade da solução pode ser observada em uma titulação condutivimétrica. Após a CMC o incremento da condutividade da solução com a adição de surfactante é menor. Normalmente o filme superficial formado é bem homogêneo e não aceita mais nenhuma molécula quando a solução atinge a CMC. Se aumentar a concentração, acima dessa concentração crítica percebe-se que a tensão superficial permanecerá constante (HUMERES *et al*, 1999).

Para concentrações abaixo da concentração crítica, a Equação 4 mostra que a tensão superficial varia linearmente com o aumento da concentração. O desvio da linearidade é observado em concentrações muito baixas ou muito altas, acima da concentração crítica.

$$\gamma = -\Gamma R T \ln(c) \quad (4)$$

A Equação 4 é chamada de isoterma de adsorção de *Gibbs*, onde  $\gamma$  é a tensão superficial,  $\Gamma$  é a área transversal da molécula,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura

absoluta e  $c$  é a concentração. Use neste caso  $RT = 411,6$  para obter o valor em  $\text{\AA}^2/\text{molécula}$  (SHAW, 1992).

A CMC de um surfactante é uma propriedade física tão importante como os pontos de fusão e ebulição ou o índice de refração de substâncias puras. A CMC de um surfactante é determinada através do estudo da variação de propriedades físicas tais como tensão superficial, condutância elétrica e outras, em função da concentração do mesmo; graficamente, uma descontinuidade na curva obtida indica o valor da CMC (HUMERES *et al*, 1999).

A adsorção de um tensoativo numa interface líquida é classicamente investigada recorrendo à medição da tensão interfacial por várias técnicas clássicas (tensiometria de anel e prato, tensiometria por análise do perfil do menisco e elipsometria). Certas técnicas electroquímicas, nomeadamente a voltametria cíclica, são também adequadas ao estudo de monocamadas adsorvidas entre dois líquidos imiscíveis (TURNER, 2001).

Nos últimos anos, o estudo de polímeros anfifílicos solúveis em água tem sido de muito interesse, principalmente para indústria de petróleo. Pesquisas nesta área têm sido direcionadas para a síntese e avaliação de propriedades em solução de polímeros hidrofobicamente modificados, os quais são caracterizados pela presença de sítios hidrófobos, pela alta atividade superficial e pelo acentuado aumento da viscosidade de soluções aquosas (DICHARRY *et al*. 2005).

O controle da viscosidade de um líquido pode ser conseguido por meio da dissolução de polímeros com alto peso molecular ou polímeros de mais baixo peso molecular contendo pequenas quantidades de segmentos hidrófobos (1-5 %mol), que promovem espessamento equivalente. O segundo método é o mais utilizado em indústria petroquímica, pelo motivo da primeira alteração ser suscetível à degradação por cisalhamento sob altas taxas, levando à perda de viscosidade quando do retorno da solução às condições de cisalhamento tendendo a zero. Os polímeros hidrossolúveis modificados hidrofobicamente, como são denominados, podem ser classificados como copolímeros anfifílicos, por apresentarem na mesma molécula segmentos hidrófilos e hidrófobos (ROTUREAL *et al*, 2004). Polímeros contendo grupos hidrófobos, solúveis em água, podem ser obtidos por meio de modificação química, por copolimerização ou por ambos os métodos. A modificação química tem sido empregada, principalmente, aos derivados da celulose e do amido, ao poli(óxido de etileno) e ao poli(ácido acrílico). A copolimerização tem sido empregada para derivados da poli(acrilamida), pois esse polímero prova ser de grande interesse, devido ao seu baixo custo (YAHYA, 1995).

Segundo YAHYA (1995), as poliacrilamidas utilizadas são parcialmente hidrolisadas em 30 a 35% de seus monômeros e fazem com que suas moléculas sejam eletricamente carregadas. O grau de hidrolisação interfere na solubilização do produto e nas propriedades, como a viscosidade e grau de retenção:

- baixa hidrolisação, menor solubilidade;
- alta hidrolisação, maior solubilidade, sensibilidade à salinidade e à dureza da água.

A sensibilidade à dureza e salinidade da água torna-se um obstáculo à utilização das poliacrilamidas em muitos reservatórios.

## **2.2 - SISTEMA INTERFACE ÁGUA/ÓLEO**

Os reservatórios de petróleo apresentam fases: sólida, líquida de viscosidade variável e gasosa. As três fases são encontradas em grandes profundidades da crosta terrestre. São formadas por resíduos de gordura que, quando em contato com o solo marinho são cobertas por areia e à medida que essa capa de areia e outros materiais vão ficando mais espessas, seu próprio peso obriga as partículas a se unirem mais formando a rocha sedimentar retendo moléculas de gordura nos seus poros, essa rocha se forma debaixo de água em zonas pouco profundas próximas à costa conforme a Figura 5 (ASIMOV, 1977).

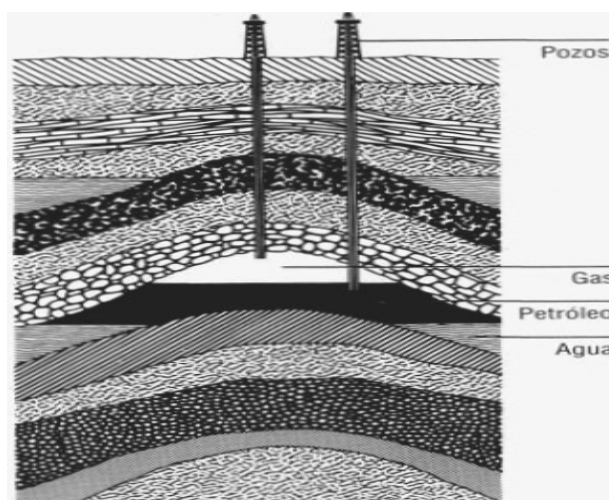


Figura 5 – Estrutura sedimentar do reservatório de petróleo (Fonte: ASIMOV, 1977)

Os reservatórios do petróleo são classificados como reservatórios de óleo ou do gás, dependendo das condições da jazida encontrada. Os coordenadores responsáveis pelo processo de exploração do reservatório de petróleo geralmente necessitam estudar o comportamento dos fluidos existentes no reservatório, assim como as características físicas do mesmo, a fim de definir uma estratégia de exploração buscando uma lucratividade máxima do poço (BRIAN, 2002).

Os projetos de exploração consistem na utilização de poços horizontais ou verticais. Estes são diferenciados pela posição do canhão produtor, sendo horizontais, quando o canhão produtor é inserido na rocha de forma a se acomodar horizontalmente no seu interior, e verticais, quando o canhão é inserido verticalmente no interior da rocha.

As formas de apresentação destes canhões dentro da rocha matriz, pode ser observada na Figura 6. As principais vantagens da utilização de poços horizontais é a redução da formação de *finger* de água ou gás, devido ao menor fluxo por unidade comprimento do poço para uma dada taxa de produção, consequência de uma maior área de contato, o gradiente de pressão na vizinhança do poço é menor. Dessa forma, os poços horizontais tendem a atrair o contato óleo/água ou óleo/gás de modo mais uniforme, formando não um cone como poços verticais, mas sim uma crista. Portanto, os poços horizontais são aplicados para casos especializados, tais como formação com várias camadas, reservatórios inclinados, reservatórios com camadas delgadas e processos de novas reservas, sendo privados sua aplicação em vários casos.

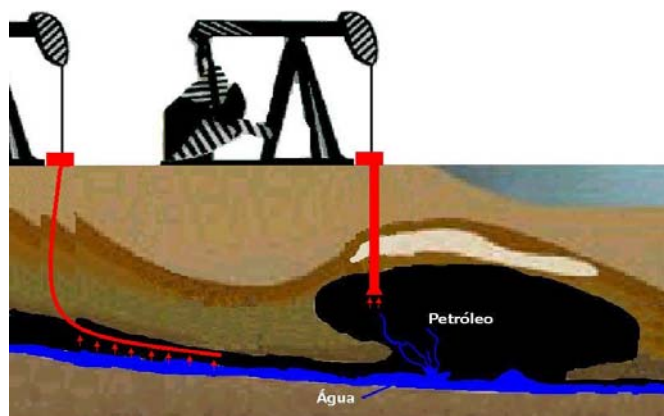


Figura 6 – Tipos de exploração de poços de petróleo – Horizontal e Vertical

Na indústria petroleira são utilizados três métodos para exploração ou recuperação de petróleo. O primeiro método a que se pode referir é o método de recuperação primária onde o óleo é recuperado através de mecanismos de produção natural, são eles: gás em solução, influxo d'água e capa de gás. A presença de aquíferos e/ou gás na forma de capa ou em solução no reservatório, ajuda no deslocamento do óleo quando o poço é perfurado. Não é em todos os reservatórios que se encontram aquíferos e/ou capa de gás para ajudar no deslocamento do óleo, então, nos casos onde não é encontrado, são necessárias técnicas conhecidas como recuperação secundária ou terciária. A recuperação secundária refere-se à injeção de gás ou de água, cujo propósito, em parte, é manter a pressão do reservatório (LAKE, 1989). A injeção do fluido no reservatório tem como finalidade deslocar o óleo para fora dos poros da rocha, apresentando comportamento puramente mecânico, sem qualquer interação de natureza química ou termodinâmica entre os fluidos ou entre os fluidos e a rocha. O fluido mais utilizado é a água por ser mais barata (THOMAS, 2001).

Cerca de 35% de recuperação pode ser conseguida pela aplicação dos métodos primários e secundários. Existe ainda, a utilização de métodos especiais de recuperação, que tem como alvo a parcela de 70% do óleo original que nem sempre é atingida; a faixa média de recuperação de óleo de reservatório fica entre 40% a 50%. As baixas recuperações resultantes de um processo convencional de injeção de fluidos podem ser atribuídas, basicamente, a dois aspectos principais: alta viscosidade do óleo do reservatório e elevadas tensões interfaciais entre os fluidos no reservatório.

Quando a viscosidade do fluido injetado é muito menor que a do fluido a ser deslocado, o primeiro se move muito mais facilmente no meio poroso. O óleo fica retido porque o fluido injetado não se propaga adequadamente no reservatório e a alta viscosidade do óleo dificulta o seu movimento dentro do meio. Para recuperação desse tipo de óleo, que é o caso do óleo pesado, são utilizados métodos especiais de recuperação, chamados de recuperação terciária. Esses métodos são classificados em três categorias: métodos térmicos, métodos miscíveis e métodos químicos. Todos os métodos têm como finalidade a redução da viscosidade do óleo ou das tensões interfaciais entre os fluidos, para aumentar a recuperação do petróleo (THOMAS, 2001). Os métodos térmicos, que objetivam a redução da viscosidade, são: injeção de vapor e combustão *in situ*. O mais utilizado é a injeção de vapor, devido às dificuldades de controlar a combustão *in situ* no reservatório (LAKE, 1989; THOMAS, 2001).

O método de recuperação terciária utilizado praticamente em todos os campos é a injeção de vapor, por ser considerado o mais eficiente. Isso porque além do método mostrar eficiência para aumentar a recuperação de petróleo, foi provado que a utilização desse método

é economicamente viável. Os fluidos que podem ser utilizados para deslocamento através do método miscível são preferencialmente o dióxido de carbono e o gás natural. Praticamente só o dióxido de carbono é utilizado, porque o gás natural é muito caro (LAKE, 1989; THOMAS, 2001). Poucos campos utilizam injeção de CO<sub>2</sub>, porque esse método apresenta o problema de contaminação do gás a ser produzido, fazendo com que frações do gás percam seu valor econômico além da possibilidade de causar danos (fraturas) no reservatório e o risco iminente de explosão. Os métodos químicos são: injeção de polímeros, injeção de solução surfactante, injeção de microemulsão, injeção de solução alcalina, etc. Esses métodos são de custos bastante elevados, e sua aplicação para o aumento de recuperação do óleo precisa ser analisada com cuidado caso a caso (LAKE, 1989; THOMAS, 2001). O método de recuperação de óleo que mais vem sendo estudado é o de recuperação secundária, que utiliza a injeção de água que pode apresentar variada composição. Pode-se utilizar a água doce captada em poços executados para este fim, a água do mar ou a própria oriunda da extração. Esta última contém uma alta concentração sal, óleo emulsionado e durante o processo de separação do petróleo pode receber produtos químicos como desemulsificantes, anti-espumantes. Pode ainda receber fluidos descartados de outros processos. A água de injeção, ao ser comprimida no horizonte produtor, através dos poços injetores, tende a aumentar ou manter a produção de uma determinada zona produtora. Esse objetivo é atingido por meio da manutenção da pressão ou por deslocamento do petróleo, na direção dos poços produtores. A água a ser injetada na zona produtora, deve ser a mais inerte possível, de modo a evitar danos ao reservatório. A injeção de água com salinidade inferior à original, em formações argilosas, pode levar à restrição, ao fluxo e à perda da injetividade no local. A presença de impurezas também pode levar à obstrução mecânica do local de injeção. Esses danos podem comprometer a própria injeção e o processo de recuperação projetado (REIS, 1996).

A Figura 7 A apresenta a relação de produção de água e produção de petróleo na fase primária e secundária de exploração de petróleo a partir da injeção de água salgada, a fase terciária apresenta variações na injeção de compostos de acordo com o processo a ser utilizado. A Figura 7 B apresenta a relação de vazão do volume de produção de petróleo em relação ao tempo de atividade do poço. Pode-se perceber através da Figura 7 A, que a quantidade de água produzida é superior à quantidade de óleo produzido. Percebe-se ainda que existe uma estreita relação entre a quantidade de água injetada no reservatório e o volume de óleo produzido. Também através da Figura 7 B, conclui-se que a fase secundária representa o maior volume de produção do poço de petróleo. Em outras palavras, pode-se dizer em relação à fase secundária, que o aumento da injeção de água eleva a produção de



óleo e água proporcionalmente; isso também pode ser aplicado para os casos de recuperação terciária. Percebe-se, além disso, que a resposta à injeção de água não é imediata.

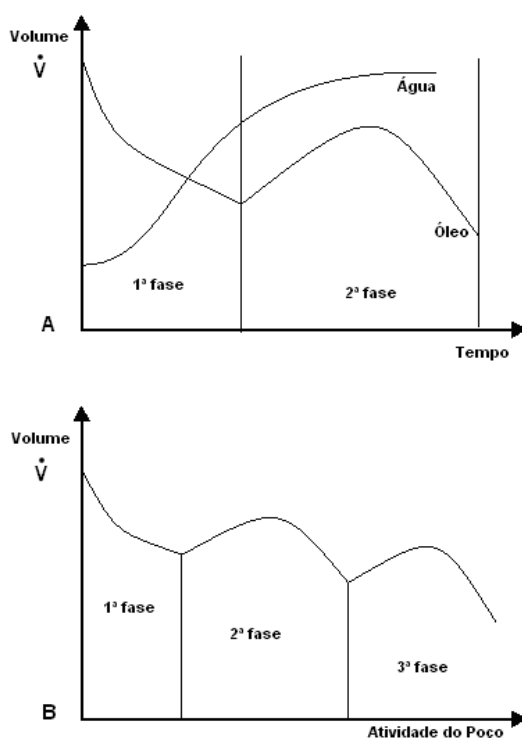


Figura 7 A - relação vazão de óleo e água na fase de exploração primária e secundária do petróleo,  
7 B - perfil do vazão de óleo produzido com o aumento de injeção nas fases de exploração.

A diminuição da produção de água pode levar a otimização do custo de produção do petróleo, devido a facilidades quanto a processos de separação e tratamento do óleo, já o aumento de produtividade de água pode causar o fechamento do poço. Uma das causas de perda de eficiência do método de recuperação, geralmente avaliada pelo aumento da proporção entre água e óleo produzido, é provocada basicamente pelo fato da viscosidade da água de injeção ser de aproximadamente 1 cP (*centiPoise*), enquanto que a do óleo comumente produzido é de 6 a 7 cP's. Isso faz com que a água tenda a ultrapassar o óleo e forme as "canalizações" denominadas *fingers*. A canalização decorre do percurso que a água faz através de um caminho preferencial em direção ao poço produtor. Como resultado, tem-se produção excessiva de água e baixa eficiência na recuperação do óleo. A injeção de polímeros, com características de viscosidade adequadas, pode ajudar a conduzir o óleo para os poços produtores. A solução polimérica pode bloquear zonas de maior permeabilidade e reduzir as canalizações. É possível reduzir a permeabilidade de um canal (*finger*) por meio de injeção de um tensoativo, polímero redutor de permeabilidade a fim de tornar uniforme o efeito da injeção (REIS, 1996).

### 2.2.1 - Fingers

O *finger* viscoso foi identificado como um dos mais importantes fenômenos em processos de deslocamentos imiscíveis (Figura 8). Na maioria dos casos, o mecanismo da instabilidade é ligado à variação da viscosidade entre o deslocamento de fluidos. Pode-se observar a evolução de um *finger* quando um líquido menos viscoso (mobilidade mais elevada) penetra em um mais viscoso (baixa mobilidade) durante um deslocamento do fluido (VOSSOUGH *et al.*, 1984). Uma instabilidade similar pode ocorrer quando um líquido mais denso se desloca verticalmente e abaixo um líquido menos denso em um meio poroso ou mesmo em uma pilha de Hele-Shaw (GUSTAFSSON E VASILIEV, 2004).

SAFFMAN E TAYLOR (1958), foram os responsáveis pelas primeiras observações dos fenômenos interfaciais em célula de Hele-shaw, encontraram o fenômeno responsável pela ineficiência do deslocamento de fluidos de alta viscosidade por um de baixa viscosidade e o nomearam de *fingers*. O *finger* foi observado quando um fluido menos viscoso (água), injetado de uma fonte, penetra um da pilha de Hele-Shaw (ou um meio poroso) cheio de um líquido imiscível (ou miscível não Newtoniano) mais viscoso (óleo). Observou-se também que os dedos se tornavam cada vez mais acentuados e que uma força considerável era a tensão interfacial entre os fluidos. Muitos estudos que relatam que o efeito da viscosidade, forças da gravidade e forças de capilares e interfaciais para o exemplo de líquidos imiscíveis, são pouco compreendidos (BENTSEN, 1985, 1987).

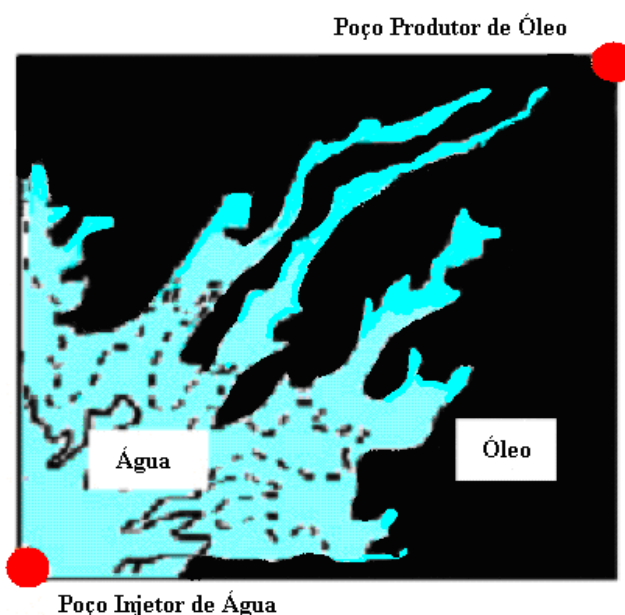


Figura 8 – Digitação viscosa (*finger*)

Investigações mais recentes mostram que a imiscibilidade tem um papel importante em definir o início de propagação de dedos viscosos em poços de petróleo (GUSTAFSSON E VASILIEV, 2004). Simulações numéricas de fenômenos como o *finger* viscoso foi considerada difícil de ser resolvida com simples computadores. Entretanto, como os computadores tornaram-se mais rápidos e mais eficientes, trabalhos numéricos de simulação começaram a ser relatados, ZIMMERMAN e HOMSY (1992) realizaram a análise de *fingers* não linear em deslocamento miscível em duas dimensões. Os resultados indicaram que os mecanismos da interação dos dedos são independentes do campo da concentração e são governados fundamentalmente pelos campos da pressão. CHRISTIE *et al.* (1991) realizaram a simulação de *fingers* viscosos em meios homogêneos e heterogêneos para um fluxo em fase simples usando de técnicas tridimensionais como diferenças finitas. Seu objetivo principal era compreender o mecanismo que impede a ocorrência do *finger* viscoso. CHRISTIE (1991) compara curvas da interface para diversas simulações bidimensionais e tridimensionais variando as relações da forças superficiais entre água e gás. ZIMMERMAN e HOMSY (1992) conduziram um modelo tridimensional, porém percebeu-se que o avanço do *finger* viscoso pode ser determinado em duas dimensões, sugeriu-se então que as simulações bidimensionais são suficientes para capturar características essenciais do *finger* viscoso. TCHELEPI *et al.* (1993) conduziram um experimento de simulação numérica para deslocamento estáveis e instáveis usando o *millstone* e núcleo de pedra calcária. Os resultados bidimensionais da simulação mostraram ajuste razoável com suas observações experimentais em fluxo instável tridimensional em meio homogêneo e aleatório heterogêneos.

O estudo de *fingers*, mostram notável importância para questões de eficiência de remediação e quantificação de problemas ambientais. Além da quantificação do vazamento de óleo de dutos submersos por unidade de tempo. Verificou-se que de acordo com as características do *finger*, viscosidade do óleo, temperatura e espessura da parede. É possível quantificar o desastre ambiental, mesmo nos casos mais difíceis como o de um navio naufragado, onde o óleo é expulso de dentro do convés a mesma taxa de entrada de água, caracterizando a digitação viscosa. Esta situação de migração de óleo para a superfície apresenta formas geométricas similares a dedos, Figura 9, que podem fornecer informações importantes até mesmo o dimensionamento do desastre ambiental (MACHADO *et al.*, 2007).



Figura 9 – A- Navio naufragando; B - Migração Advectiva convés de navio naufragado. (Fonte: BBC Brasil)

Os *fingers* também tomam notável importância em sistemas de remediação de lençol freático e até mesmo no processo de contaminação onde o dedo de óleo toma caminhos preferenciais meio aos poros do subsolo. A eficiência deste processo se mostra comprometida quando o fluido injetado, com finalidade de deslocar o óleo para um ponto de captação, toma caminho preferencial dentre o meio poroso (solo), reduzindo a taxa de óleo deslocado, ou quando no processo de sucção de óleo acomodado sobre o lençol freático, a água adentra a fase óleo atingindo o bico responsável pela aspiração da camada de óleo em fase livre. A Figura 10, mostra o perfil bidimensional do derramamento de um hidrocarboneto no solo, a água toma caminho preferencial meio ao óleo, aproveitando ainda frestas naturais do solo formando *fingers*.

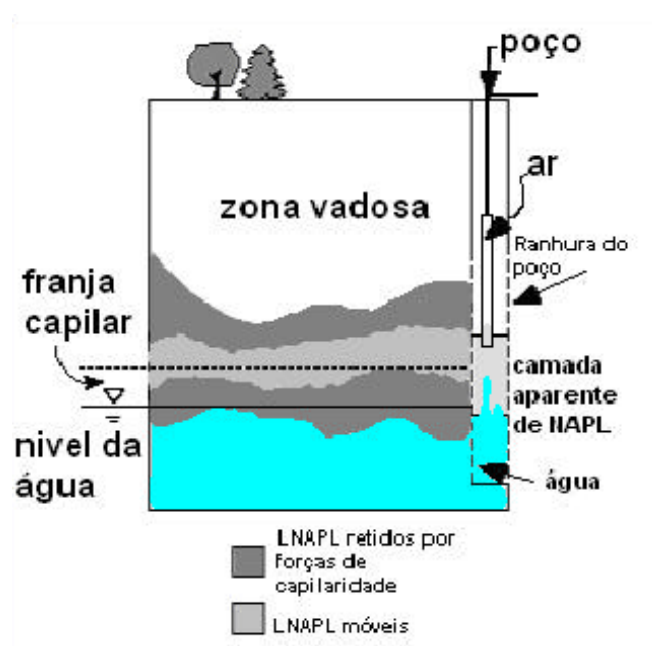


Figura 10 – Perfil bidimensional de um sistema de remorção de fase livre acomodada sobre lençol freático

Com o desenvolvimento tecnológico, pode-se prever que estudos de instabilidade interfacial e desenvolvimento dos *fingers*, principalmente no que diz respeito à modelagem matemática com o desenvolvimento de um modelo computacional, é de grande importância para o controle de processos dos casos relacionados. O conhecimento da fenomenologia e propriedades interfaciais é indispensável para a tomada de decisão da tecnologia a ser usada em projetos seja de exploração de reservatórios ou relacionados a escoamentos multifásicos.

### 2.3 - CÉLULA DE HELE – SHAW

Henry Selby Hele-Shaw (1854 – 1941), foi engenheiro naval, trabalhou de 1885 – 1904 no Departamento de Engenharia da Universidade de Liverpool. O primeiro estudo publicado por Hele-Shaw, em 1898 foi relacionado à simulação de um fluxo líquido em um tubo ou em uma canaleta (placas) com lados molhados, onde a velocidade alcança seu valor máximo no meio da canaleta (placas) e desaparece nos lados conforme mostrado na Figura 11 - A, pode ser observada uma transição do fluido de regime laminar para turbulento. Mais tarde, um modelo ligeiramente diferente aparece. Neste modelo um fluido viscoso ocupa domínio limitado, encontrando-se entre duas placas de área delimitada, o líquido pode ser injetado ou removido através de um ponto, esse aparato, ficou conhecido como célula de Hele-Shaw Figura 11 - B (GUSTAFSSON E VASLIEV, 2004).

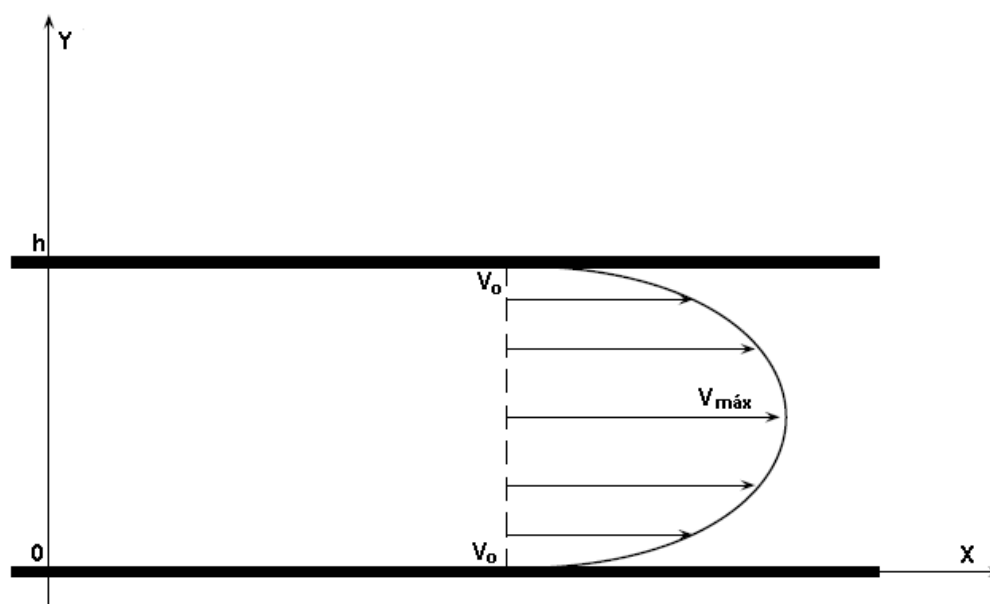


Figura 11 - A - Perfil de escoamento em um tubo, canaleta ou placas estáticas

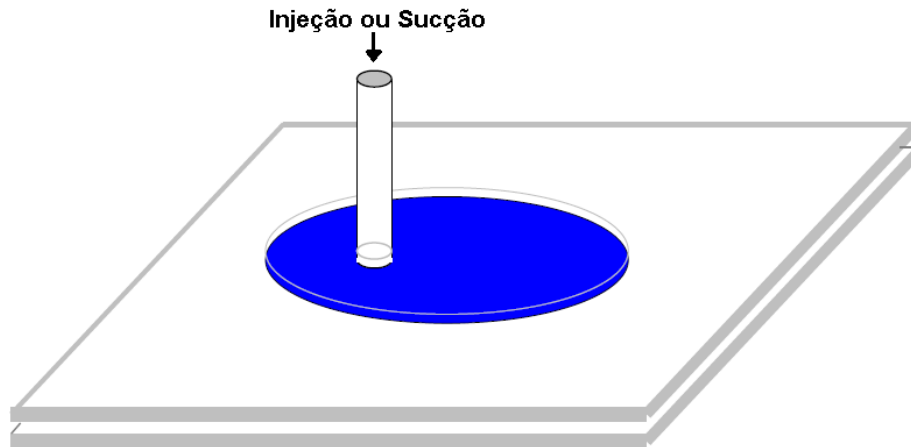


Figura 11 - B - Célula de Hele-Shaw (Fonte: GUSTAFSSON E VASLIEV, 2004).

Um dos estudos mais famosos em que foi utilizada a Célula de Hele-Shaw foi realizado por SAFFMAN-TAYLOR em 1958, onde foi identificado e analisado o comportamento do sistema óleo - água além de realizar uma modelagem da fluidodinâmica dos sistemas imiscíveis em meios porosos. COSKUNER E BENTSEN (1986) também utilizam a Célula de Hele-Shaw para desenvolver estudos sobre balanços de forças na interface que separa dois fluidos, foi posto óleo na célula e posteriormente injetou-se água empurrando o óleo, principalmente por diferencial de pressão de bombeamento.

Segundo TYGGVASON e AREF (1983), a interface entre fluidos imiscíveis na Célula de Hele-Shaw pode ser instável por duas razões, se um fluido pesado está no topo de outro mais leve, a interface é instável de forma gravitacional. Na disposição inversa, um fluido menos viscoso é utilizado para deslocar o mais viscoso, podendo a interface também se tornar instável. Num determinado processo, estes dois efeitos podem ocorrer simultaneamente.

TRYGGVASON E AREF (1984) observam que os estágios iniciais de evolução da forma da interface são largamente independentes da viscosidade. Segundo eles, isto é consistente com análises de estabilidade linearizadas, onde as taxas de crescimento das ondas instáveis não apresentam relação com a viscosidade do meio. A Figura 12 mostra seqüências de tempos, do trabalho de TRYGGVASON E AREF (1984), envolvendo as interfaces perturbadas a partir de uma interface plana. Para todas as corridas, o comprimento das ondas bases são aproximadamente iguais, sendo (a)  $A=0$ ; (b)  $A=0,5$ ; (c)  $A=1,0$ . Aqui, o parâmetro  $A$  indica a razão entre as viscosidades do óleo e água. Nota-se na Figura 9, da esquerda para a direita, o aumento da perturbação e o crescimento dos fingers.

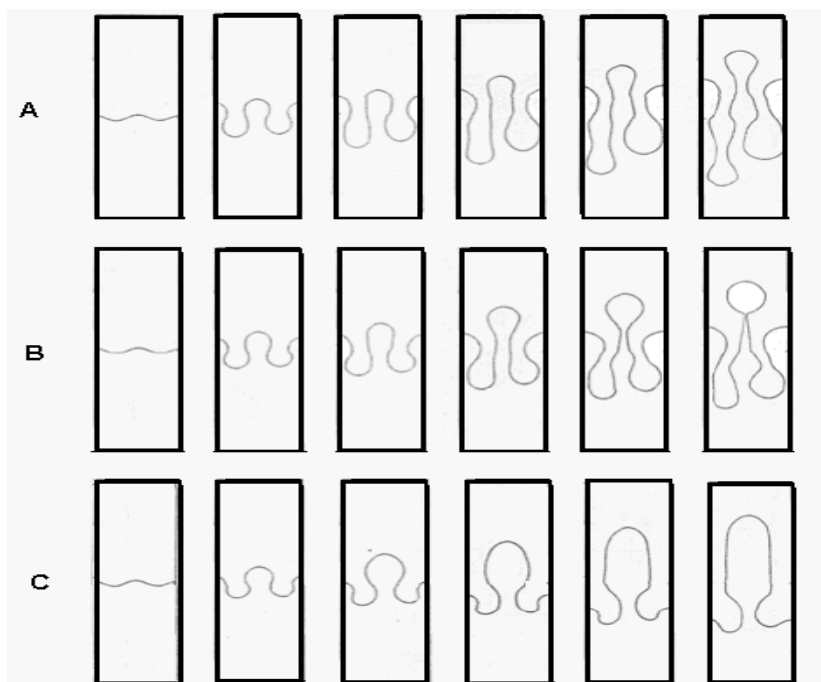


Figura 12 - Três seqüências de digitação a partir da perturbação da interface (Fonte: TRYGGVASON, 1984)

MAXWORTHY (1986) introduziu um método simples para avaliar o crescimento da interface. Seu estudo foi realizado em um aparato no qual os fluidos escoavam verticalmente. As medidas do crescimento da interface foram realizadas nesta direção. A importância desta análise deve-se à quantificação do tempo que o fluido de menor viscosidade leva para atingir a extremidade oposta da célula e a comprovação de um deslocamento menos efetivo do fluido de maior viscosidade.

Um estudo realizado por GADÊLHA (2007), discutiu a existência de competitividade entre os dedos de água, afirmando que os dedos dominantes (“*fastest growing mode*”), crescem mais rápido do que os outros, suprimindo o crescimento dos dedos menores na sua vizinhança, dando origem a uma “competição” entre eles. O estudo realiza uma modelagem matemática para um sistema Hele-Shaw Girante onde foram consideradas as força de Coriolis e centrífuga.

BRACKBILL *et al* (1992) propuseram uma modelagem a partir de efeitos da tensão superficial no movimento de fluidos. Foram estudados interfaces entre fluidos de diferentes propriedades físicas considerando regiões de transição de espessura finita. O estudo definiu que quando um fluido é suportado por outro fluido, aparece uma instabilidade que provoca ondas na interface (*Rayleigh-Taylor*) crescendo exponencialmente com o tempo, para pequenas amplitudes.

---

Os modelos matemáticos apresentados na literatura para descrever o deslocamento imiscível de um fluido por outro em meios porosos e em células de Hele-Shaw são idênticos do ponto de vista matemático, contudo o domínio físico num caso e outro são diferentes. Fala-se que uma célula de Hele-Shaw é 'limpa', enquanto que uma rocha é intrinsecamente 'ruidosa', o que causa distorções nos padrões de escoamento destes deslocamentos imiscíveis. Apesar disso, estudos em células de Hele-Shaw para análise de deslocamentos imiscíveis em meios porosos são muito freqüentes e aceitáveis, pois conseguem produzir bons resultados (BENTSEN, 1985, 1987).

Modelos tridimensionais para o deslocamento de fluidos imiscíveis impõem grandes dificuldades matemáticas, uma vez que a distribuição de potenciais de força de cada um dos lados da interface deve ser determinada simultaneamente e ao longo do tempo, com o desenrolar do processo. A utilização de soluções *a priori*, baseadas na equação da onda plana simétrica, com a incorporação de conceitos de potencial de força e da teoria de estabilidade de interfaces, ao mesmo tempo em que permite uma abordagem realística do fenômeno, representa uma imensa economia de arsenal matemático. Por isso, tem-se investido fortemente nos modelos de digitação viscosa para células de Hele-Shaw que contemplam este tipo de modelagem.

As propriedades físicas envolvidas nos fenômenos interfaciais de líquidos imiscíveis, como a viscosidade, a densidade e a tensão interfacial, são também de grande importância para tanto para o estudo de células Hele-Shaw como para estudo do processo de migração advectiva em dutos submarinos, pois trazem informações preciosas sobre como prever o comportamento e a forma geométrica da interface em sistemas água-óleo, além de uma boa fundamentação fenomenológica no que diz respeito às teorias de perturbação, aos critérios de estabilidade e à modelagem matemática do fenômeno da digitação.

Estudos de vazamentos em dutos submersos (migração advectiva) utilizam conceitos fundamentais de grande importância e que guardam relação com os estudos realizados em Célula de Hele-Shaw.

O estudo desenvolvido por NG *et al.* (2002) fornece uma base para análises de várias fontes de instabilidades que podem levar à geração de ondas na interface entre as fases, a formação de escoamento do tipo *slug*, ou até mesmo a transição de fluxo laminar para turbulento. O estudo matemático de um escoamento do tipo estratificado, o qual se utiliza da solução da equação de Navier-Stokes em duas dimensões, tenta demonstrar que, a complexa forma geométrica da interface líquido-líquido originada no escoamento estratificado de dois



líquidos imiscíveis, pode ser determinada através do ângulo de contato dos líquidos com a parede sólida (ponto triplo), do *holdup* da fase mais densa e do balanço entre as forças gravitacional e de tensão superficial.

Como já comentado, o vazamento de um hidrocarboneto líquido (óleo) contido em um duto submerso possui uma relação estreita com deslocamentos imiscíveis em uma célula de Hele-Shaw. Assim, a partir de um orifício circular em um duto submerso, pode-se considerar o problema do surgimento da instabilidade e do vazamento como sendo análogo ao problema de uma membrana circular vibratória. Quando a interface água-óleo, inicialmente plana (Figura 13 - A), é perturbada devido às diferenças entre as propriedades físicas dos fluidos, muitas vezes um dedo de água penetra na fase óleo enquanto que outro dedo de óleo penetra na fase água produzindo o deslocamento do óleo devido à migração da água para dentro do duto onde o óleo está confinado, conforme Figura 13 - B. A distribuição de potenciais das interfaces varia conforme a evolução das superfícies, o que resulta em uma abordagem tridimensional (MACHADO *et al.*, 2007).

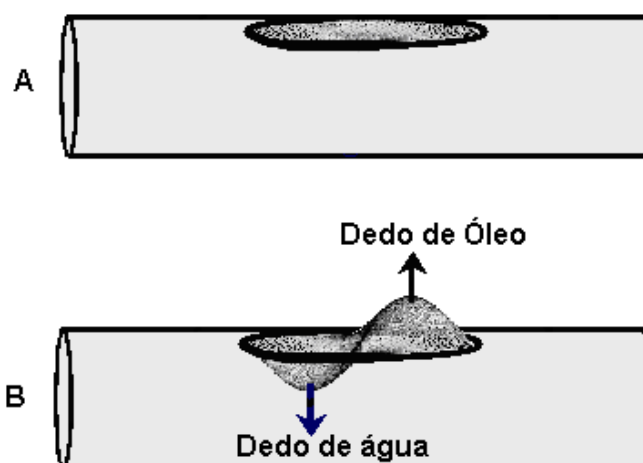


Figura 13 - A - membrana circular em repouso; B - membrana circular perturbada.

Para a abordagem matemática, inicialmente supõe-se que a instabilidade e o deslocamento imiscível (aparecimento e desenvolvimento dos dedos) possa ser tratado segundo um problema de onda bidimensional. Uma abordagem 3D em geometria cilíndrica foi proposta (BAPTISTA *et al.*, 2004) e pode revelar aspectos mais realistas dos escoamentos imiscíveis de água e óleo, como os que ocorrem no interior de dutos, na indústria petrolífera.

---

## 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas experimentais e computacionais realizadas para o estudo do sistema. O estudo experimental tem como objetivo avaliar os fatores atuantes no aparecimento da digitação viscosa em operações de deslocamento de óleo por injeção de água. Uma célula de *Hele-Shaw* foi usada para a realização dos ensaios com água e óleo de soja colorido sendo utilizados para simular o sistema água/petróleo. Porém, com as dificuldades inerentes ao sistema experimental, a realização de um estudo prático sistemático e livre de interferência de outros fatores fica prejudicada. Para contornar tal situação, o estudo do processo a partir de um modelo computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) mostra-se como uma alternativa para o detalhamento do efeito interfacial água/óleo no processo de bombeamento.

### 3.1 - ESTUDO EXPERIMENTAL

#### 3.1.1 - Planejamento Experimental

O planejamento experimental é uma ferramenta estatística bastante utilizada que tem como principais objetivos a determinação do número ideal de experimentos que leve à obtenção de resultados com um dado grau de confiabilidade e à determinação da influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo.

O planejamento experimental é essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos. Um planejamento adequado permite, além do aprimoramento de processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução do tempo de análise e dos custos envolvidos (BUTTON, 2005).

Para elaboração de um planejamento experimental, além de dominar a metodologia estatística necessária para o planejamento e para a análise dos dados, o pesquisador deve conhecer exatamente o que deseja estudar, como obter os dados, bem como ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados.

Também é desejável, sempre que possível, o estabelecimento de um modelo físico-matemático que estabeleça funções que relacionem as diversas variáveis atuantes no processo com os resultados a ser analisado. A construção dos modelos pode ser realizada de maneira manual, ou com auxílio de programas de computador específicos para simulação, sendo esta última a de maior frequência e importância. Em seguida, faz-se necessário validar o modelo frente aos dados disponíveis.

O planejamento experimental escolhido para o presente estudo foi do tipo planejamento fatorial  $2_{IV}^{4-1}$  com ponto central em triplicata. A Tabela 1 mostra os níveis dos fatores, ângulo de inclinação, distância entre as placas, concentração de cloreto de sódio NaCl e vazão de injeção na água. A resposta do sistema foi medida pela área do óleo em atraso relativamente à linha média. A seleção das variáveis e seus respectivos níveis visam possibilitar uma análise detalhada do sistema utilizado, permitindo a definição do fator mais influente na formação e desenvolvimento do fenômeno de digitação viscosa, a qual, por sua vez influencia diretamente na eficiência de deslocamento do óleo.

Tabela 1 - Fatores e níveis analisados

<i>Fatores</i> <i>Níveis</i>	-1	0	+1
Ângulo (°)	0	15	45
Espessamento entre as placas (mm)	1,1	2,3	3,0
Concentração de NaCl (% p/v)	0	3,0	6,0
Vazão (mL s <sup>-1</sup> )	1,52	1,72	2,38

O aparato experimental utilizado consiste em uma célula de Hele-Shaw (Figura 14) com placas de vidro temperado de 100 cm de comprimento, 30 cm de largura e 1 cm de espessura. As placas são fixadas paralelamente, afixadas por grampos, formando assim uma canaleta entre as placas que possibilita o escoamento de fluidos. Para a vedação entre as placas foram utilizadas tiras de um copolímero (etileno – acetato de vinila) EVA, em espessuras de 2 e 4 mm. Com o auxílio do EVA e de espaçadores de aço inox de 1x1 cm<sup>2</sup>, e espessuras de 0,05; 0,06; 0,08; 0,10; 0,15 cm alojados em pontos específicos entre as placas, foi possível obter boa vedação e distanciamento uniforme. O nivelamento é realizado antes do início dos experimentos, a fim de garantir que o efeito gravitacional atue somente no sentido longitudinal.

Considerou-se que a atuação da gravidade no sentido da espessura das placas é desprezível, devido às pequenas distâncias utilizadas entre as placas.

A injeção de água é feita por um orifício na parte inferior da placa, promovendo o deslocamento ou elevação do óleo acomodado entre as placas. A estrutura em aço para controle de angulação serve também como suporte para as placas de vidro. Na parte superior da célula existe uma calha por onde, alternativamente, é possível introduzir tanto o óleo quanto a água, o acessório também auxilia no recolhimento do óleo e água injetados entre as placas. Uma bomba peristáltica foi utilizada para os procedimentos de admissão dos fluidos. A cada ensaio realizado, a célula de Hele-Shaw é desmontada, lava-se o vidro, borracha de E.V.A. e a estrutura de aço inox. Secam-se todos os componentes, só então, a célula é montada, conforme as considerações dos fatores, para realização de novo ensaio.

A célula permite a realização de ensaios em diferentes ângulos e espaçamentos entre as placas, de forma a permitir o estudo e avaliação dos efeitos da gravidade e capilaridade sobre o deslocamento dos fluidos (água/óleo), com o eventual aparecimento do fenômeno da digitação viscosa.

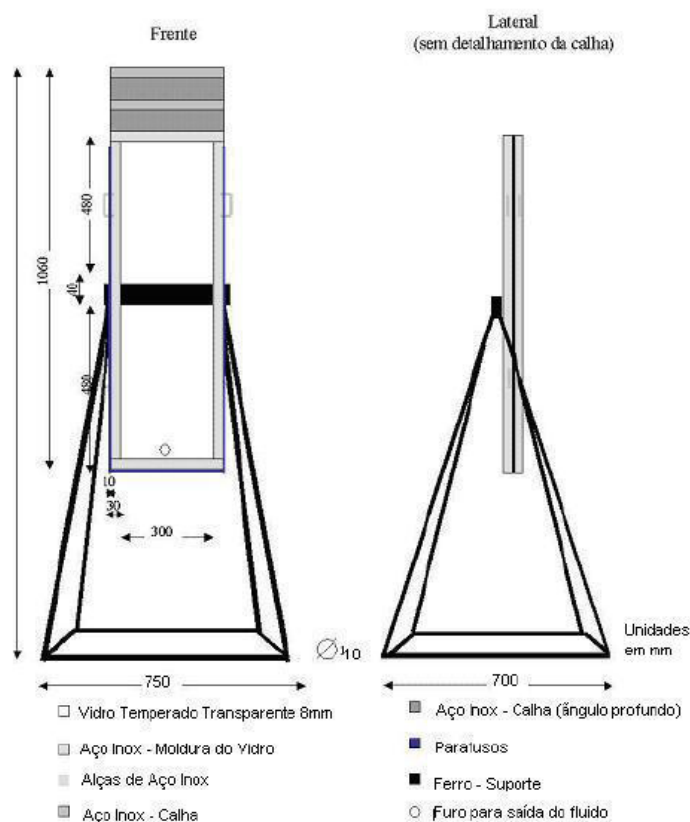


Figura 14 – Aparato experimental Célula de Hele-Shaw. (Fonte: FIORESE, 2004)

### 3.1.2 - Material

Para o experimento, foram utilizados água destilada, óleo de soja comercial e sal de cozinha.

Devido à necessidade de variação controlada da composição da água do sistema, foi necessária a utilização da água destilada. Esta contém unicamente os elementos oxigênio e hidrogênio, o que facilita o controle no caso da alteração de sua composição pela adição de um componente como o sal de cozinha utilizado, em percentuais de 0%, 3% e 6% p/v.

Quanto às características do sal utilizado, verificou-se a seguinte composição: sal refinado, Iodato de Potássio. Antiumectantes: Ferrocianeto de sódio e Alumínio Silicato de Sódio.

Utilizou-se óleo de soja temperatura de 25°C, com densidade ( $\rho$ ) de 0,920 g/cm<sup>3</sup> e massa específica ( $\mu$ ) de 0,558 g/cm.s.

A fim de melhorar a visualização (contorno) da interface, foi adicionado ao óleo de soja, um corante azul (Azul Profex). Este corante de fácil dissolução em substâncias orgânicas apolares, ajuda na visualização da interface, oferecendo um maior contraste de cores entre o óleo e a água, facilitando assim o processo de tratamento de imagem do experimento.

A escolha do óleo de soja se justifica pelo fato desse apresentar características similares a certos petróleos nacionais. Portanto, o emprego do óleo de soja, além de facilitar a visualização do fenômeno da digitação de água no óleo, possibilita o estudo de um sistema similar e nos dá a possibilidade de realizar comparações e criar uma base de observação, a qual será utilizada em sistemas água/petróleo (FIORESE, 2004).

### 3.1.3 - Métodos

Através do bombeamento de água para dentro da célula de Hele-Shaw, promoveu-se o deslocamento da fase óleo. A injeção de água com corante azul em meio à água pura foi utilizada para determinação da altura da perturbação causada pela alimentação da água na célula. Assim, se procurou estabelecer a altura inicial da interface água/óleo, longe o suficiente do ponto de admissão da água de modo a se ter um escoamento uniforme junto da interface. Para verificação do ponto de estabilização e uniformização do fluxo de água existente entre as

placas, somente no sentido horizontal das placas (24 cm), foram testadas várias configurações de chicanas em várias alturas e posições do ponto de admissão da água. Utilizou-se um corante azul de metileno para colorir a água a ser injetada, o procedimento foi observado e gravado por uma filmadora digital. O objetivo foi determinar uma configuração que promova a maior estabilidade do perfil de velocidade, em menor distância percorrida pelo fluido. O experimento possibilitou verificar visualmente o perfil de velocidade do fluido injetado. A Figura 15 A e B mostram o desenvolvimento de 2 experimentos testes de perfis para chicanas. A Figura 16 mostra a chicana que apresentou maior efeito uniformização e estabilização do perfil de velocidade da água injetada na menor distância percorrida possível.

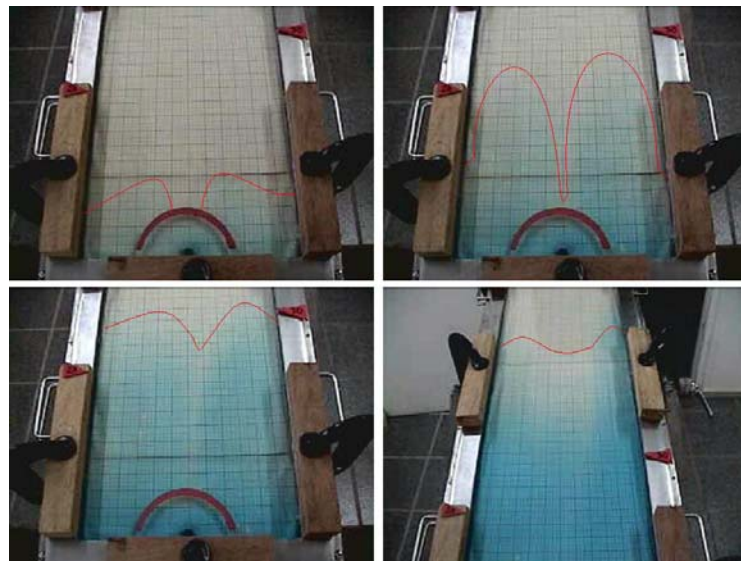


Figura 15 A - Experimento-teste 1 de perfil e eficiência de chicana.

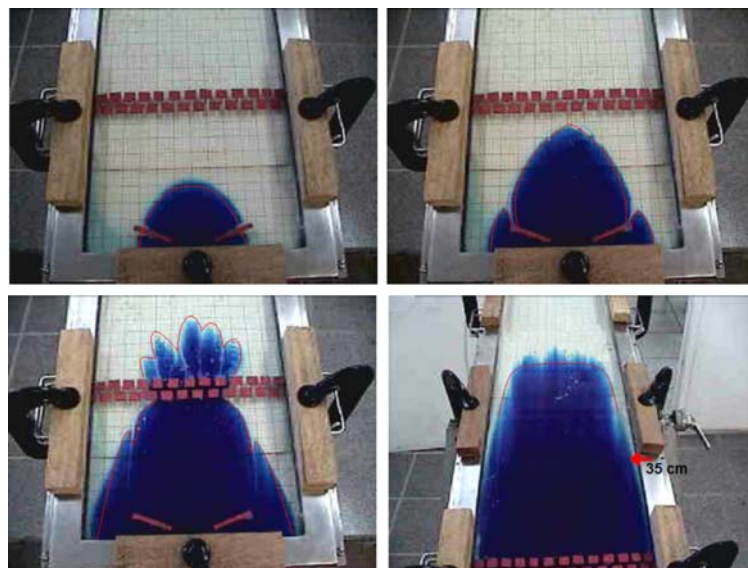


Figura 15 B – Experimento-teste 2 de perfil e eficiência de chicana.

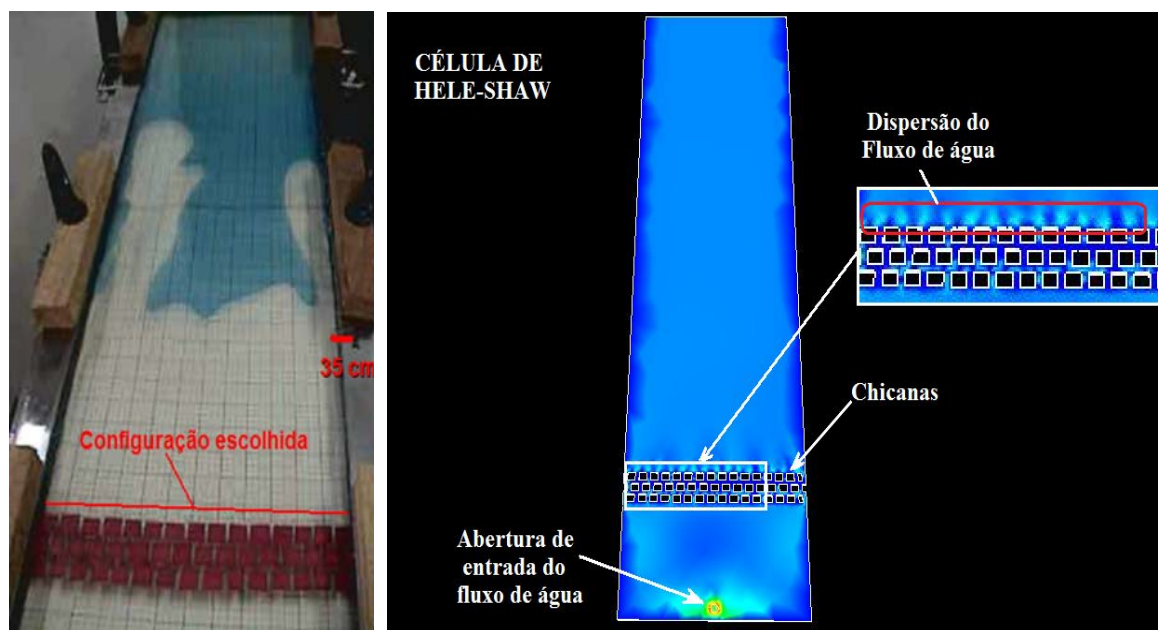


Figura 16 - Configuração da melhor eficiência da chicana quanto à estabilização do fluxo x distância percorrida.

Assim, determinados os pontos ideais para a acomodação da interface, iniciaram-se os experimentos. O primeiro passo envolveu a montagem e nivelamento do equipamento, a fim de garantir um equilíbrio fazendo com que a força gravitacional atue somente no sentido longitudinal das placas. Utilizaram-se grampos de aço, conforme a Figura 17, para pressionar as placas de madeira que, uniformemente distribuíram força sobre as bordas da superfície dos vidros, no sentido do encontro das placas. Para o estabelecimento da distância e vedação entre as placas, utilizaram-se borrachas de E.V.A. Espaçadores de aço inox de diferentes espessuras garantiram a uniformidade do espaçamento entre as placas.

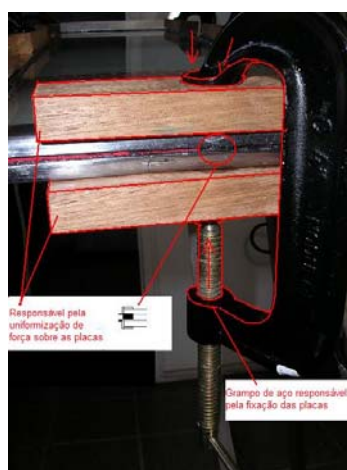


Figura 17 – Grampo de aço apoiado sobre peças de madeira para a fixação das placas.

A água foi inserida, através de uma entrada na base inferior da célula, por uma bomba peristáltica, até uma distância correspondente à estabilização do fluxo de água entre as placas, fixada em 35 cm. Após, com a célula em pequeno ângulo com a horizontal, óleo é vertido pela calha situada na extremidade superior, até que o volume correspondente à distância de 70 cm, a partir do ponto de admissão da água, seja completado. A altura de coluna d'água e de óleo deve corresponder a 35 cm cada. A partir daí, o bombeamento do restante da água só é realizado quando a interface dos dois fluidos estiver estável, inclinando-se, então, a célula até o ângulo pré-estabelecido.

Após a realização dos procedimentos acima, a célula de Hele-Shaw é posicionada a um ângulo pré-estabelecido, verifica-se novamente o nivelamento e espera-se a estabilização da interface, isto é, até obter uma interface água-óleo a mais horizontal possível. Então, dá-se início ao ensaio pelo bombeamento da água no sistema. O bombeamento é feito através de uma bomba peristáltica, que capta água ou água salobra do bico de uma bureta, assim, torna-se possível determinar o volume de água injetado e distâncias médias de deslocamento da interface entre os fluidos água/óleo.

Ao final de cada ensaio, inclina-se a célula de forma que todo o óleo e a água presentes entre as placas escoem para a calha onde são depositados e em seguida levados por uma mangueira a um refugio para evitar contaminações à rede de esgoto local; após tal procedimento o equipamento é aberto e limpo.

#### 3.1.4 - Tratamento de imagem

O registro das imagens experimentais é feito por uma câmera digital de resolução igual a 3,2 *megapixels*, posicionada perpendicularmente às placas e fixada a uma distância de 40 cm. Foram feitos registros da imagem no momento correspondente a um deslocamento médio de 6,6 cm da interface em relação posição inicial.

A imagem obtida dos procedimentos experimentais é tratada de modo a se produzir regiões de cores diferentes (azul para o óleo e branco para a água), para depois ser processada em um *software* que varre a imagem horizontalmente, *pixel* a *pixel*, linha após linha, deslocando-se de cima para baixo. O primeiro *pixel* branco e o último *pixel* azul são referentes ao ponto mais avançado do *finger* de água mais adiantado e ao ponto mais atrasado da fase óleo, respectivamente. Determinados esses extremos, é possível localizar a linha



média horizontal entre os mesmos, de modo a dividir essa região em áreas iguais de água e óleo acima e abaixo da linha média, respectivamente. Isso é possível desde que se conheçam as áreas relativas a cada *pixel*. Como a câmera fotográfica foi posicionada suficientemente longe das placas, consideraram-se todos os *pixels* com igual área. A Figura 18 apresenta o equipamento com a bomba peristáltica e a câmera fotográfica.

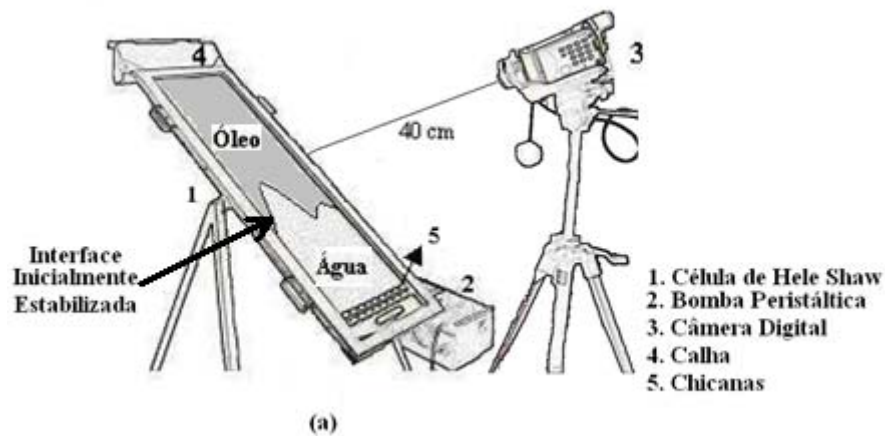


Figura 18 – Célula de Hele-Shaw. Sistema inclinado preparado para aquisição fotográfica. (Fonte: FIORESE 2004)

A determinação da linha média na região interfacial possibilita o cálculo de área e volume de óleo em atraso. Considera-se que quanto maior a área em atraso, maior a instabilidade do processo. A Figura 19 mostra a disposição da interface água-óleo e um esquema do tratamento de imagem realizado para a determinação da linha média através da leitura e contabilização dos *pixels* azuis e brancos.

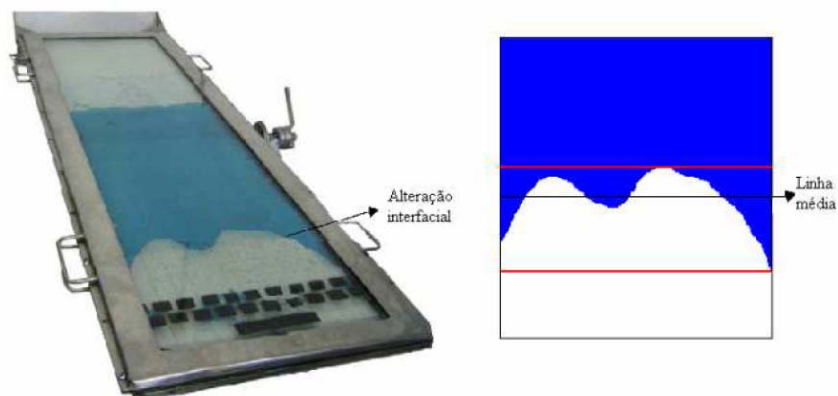


Figura 19 – Esquema do tratamento de imagem e definição de região interfacial estudada.

A eficiência do processo de bombeamento é calculada subtraindo-se da unidade o valor da razão entre o volume de óleo em atraso e volume de água injetada.

### 3.2 - ESTUDO COMPUTACIONAL

O estudo computacional começou com o estabelecimento da geometria do domínio, tal qual a célula de Hele-Shaw, como utilizada na prática. Foi utilizado um *software* de simulação computacional *CFD*, para construir a geometria e assim representar o volume de controle através do qual os fluidos escoam.

O desenvolvimento da simulação computacional foi realizado em um computador de alta performance (servidor) munido do *software* *Ansys 11*, adaptado a um *cluster* de 30 máquinas que trabalham sobre o sistema de *Parallel Virtual Machine (PVM)*. Foram utilizados os programas *ICEM CFD* para a construção da geometria e *CFX* para o estabelecimento de domínios e condições de contorno; *SOLVER* para solução numérica do problema e *POST CFX* para avaliação dos resultados.

O volume de controle que representou a célula de Hele-Shaw, desde já, denominado modelo computacional Hele-Shaw, apresentou dimensões de 100 cm de comprimento por 24 cm de largura e espessuras definidas segundo níveis considerados previamente pelo planejamento experimental. Em um primeiro momento, foram desenhadas as chicanas, orifício circular de entrada, saída de fluidos pela parte superior, paredes laterais, buscando a representação da borracha de EVA, e paredes de vidro, conforme o quadro comparativo da Figura 20.

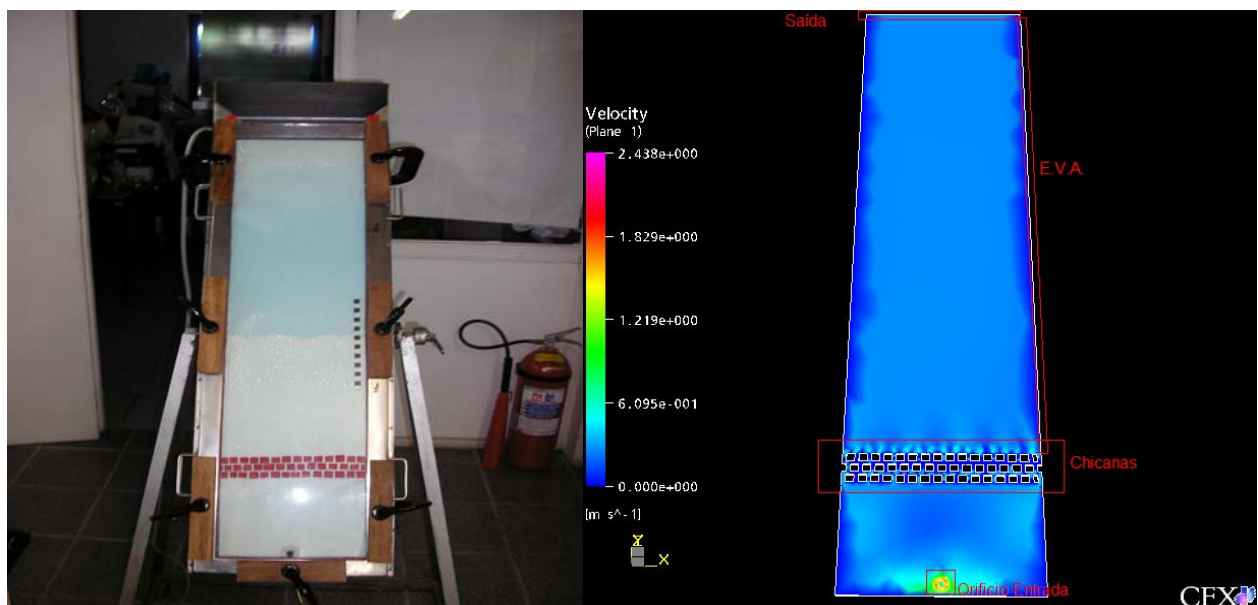


Figura 20 – A Célula de Hele-Shaw segundo a montagem experimental e ao lado uma representação do modelo computacional.

Inicialmente, utilizou-se uma malha tetraédrica extrusada, que possibilitou o detalhamento do fluxo entre as chicanas. Porém, esse tipo de malha dificultou as atividades de solução computacional devido ao grande número de elementos, que influenciam diretamente no tempo de simulação. Outro ponto observado foi a falta de definição da interface, onde os fluidos apresentaram uma faixa de transição entre as frações volumétricas. Esta faixa de transição apresentou valores que podem introduzir a percepção errônea de uma miscibilidade parcial entre fluidos, dificultando a visualização dos *fingers*.

Para driblar tal dificuldade, buscou-se a criação de outro tipo de malha, utilizando a malha tetraédrica somente para testes de validação da chicanas. Estes testes buscaram comprovar a eficiência das chicanas na estabilização e distribuição do fluxo de água injetada.

Em um segundo momento, confirmada a eficiência da chicana em relação à injeção de água na célula, foi implementada uma malha hexaédrica extrusada e desconsiderada a porção geométrica envolvendo a chicana. Com isso, excluiu-se a chicana e considerou-se a injeção de água de forma uniforme, a partir da extremidade inferior da célula de Hele-Shaw. A utilização da malha hexaédrica, reduziu o número de elementos e aumentou a precisão da solução do problema, facilitando o processamento de dados.

Com a utilização da malha hexaédrica, e a possibilidade de melhorar o refino em regiões estratégicas aumentou o nível de definição na visualização gráfica da interface, além de acelerar o processamento de dados do problema. O refino na espessura da placa, representado no detalhe 1, na Figura 21, possibilitou um bom grau de detalhes quanto à visualização lateral da interface, facilitando o estudo do efeito de parede considerado pela condições de contorno aplicadas ao vidro. A parte central da célula de Hele-Shaw, região 2 da Figura 21, compreende a porção onde ocorre o contato e escoamento da interface, o refino nessa região possibilita uma melhor definição na visualização gráfica da interface. As regiões representadas como 3 na Figura 21, correspondem às porções onde existe somente fração volumétrica inteira, ou seja, água ou óleo. A falta de refino na região 3 além de não alterar o resultado da simulação, promove uma otimização do processo computacional, visto que traz uma economia no número de elementos, o que acarreta um aumento de velocidade do processamento de dados. Detalhes da malha utilizada são apresentados na Figura 21.

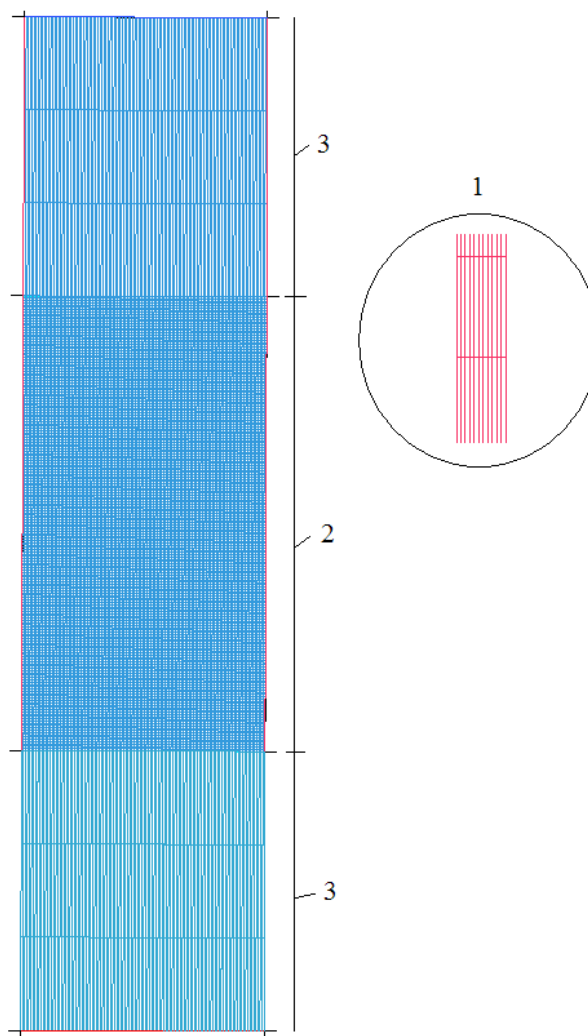


Figura 21 – Representação da malha hexaédrica estruturada.

Outro ponto a se destacar é a melhor definição da interface. Na simulação onde foi utilizada a malha tetraédrica, a zona de transição entre as frações volumétricas de óleo e água, apresentou uma difusividade de natureza numérica, que poderia ser confundida com miscibilidade parcial, essa difusividade foi minimizada com a utilização da malha hexaédrica, o que possibilitou uma melhor definição na visualização dos fingers.

Para simulação computacional, foi realizado um novo cálculo para os valores de injeção de água de forma que os valores de injeção pelo orifício circular e pela extremidade inferior entre as placas de vidro estivessem em proporção correta. As proporções entre velocidades dada pelo balanço de massa entre vazões volumétricas e área da seção transversal das vazões são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de velocidade de injeção de água através do orifício circular e da seção transversal perpendicular ao escoamento.

Níveis / Planejamento	Velocidade no orifício circular (cm/s)	Velocidade média entre as placas (cm/s)
-1	1,93	0,731
0	2,20	0,840
+1	3,03	1,140

O sistema computacional permite a realização de ensaios em diferentes ângulos e espaçamento entre placas, propriedades dos fluidos, velocidades de injeção de fluidos, diferentes materiais da parede, de forma a permitir o estudo e avaliação dos efeitos fenomenológicos sobre o sistema, além de outros fatores importantes para a modelagem como a escolha das condições de contorno. Para a determinação das diversas condições de simulação, buscou-se amparo na medição de parâmetros físicos e químicos a partir do estudo experimental.

A definição e montagem do problema podem ser implementadas a partir da interface gráfica apresentada pela Figura 22. Aqui devem ser fornecidas propriedades e atribuídos valores numéricos aos campos pertinentes à resolução do problema.

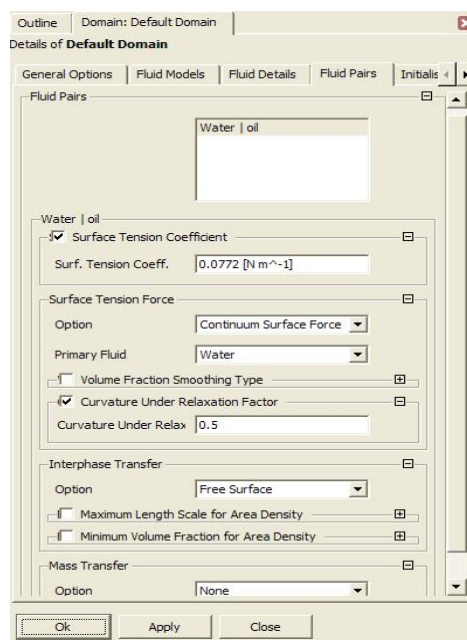


Figura 22 – Interface gráfica para a definição de propriedades interfaciais, Ansys CFX 11.0.

Para determinação das condições de contorno do modelo computacional Hele-Shaw, deve-se considerar todas as condições observadas na etapa experimental; foram determinadas: a altura inicial, condições de pressão interna nos fluidos, adesividade da parede, velocidade de entrada e demais detalhes.

A linguagem matemática utilizada é de fácil leitura, sendo possível discemir valores, e condições aplicadas, sem o conhecimento aprofundado de programação computacional. Mas o conhecimento da linguagem matemática não é suficiente para o entendimento e a validação do modelo computacional construído. Além de entender a linguagem utilizada e as equações aplicadas na solução do problema, deve-se dominar a física do problema. O domínio da física e o conhecimento do processo simulado facilitam o entendimento dos resultados apresentados nos relatórios finais de processamento de dados, assim como na postagem gráfica dos resultados, podendo-se assim ter uma visão crítica das respostas geradas.

Para um melhor entendimento das condições aplicadas, inicia-se então uma descrição das considerações físicas e forma de aplicação dessas condições ao *software* utilizado. A princípio, dá-se destaque aos principais elementos do estudo proposto: os fluidos óleo e água.

No quadro de comandos do cfx, pode-se observar o item Material. Este item abre janelas onde podem ser atribuídas as propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados. Para materiais, considerou-se os fluidos água e óleo, aplicando valores de substância pura, em fase líquida, com viscosidades de 0,01 g/cm s e 0,558 g/cm s, com densidades de 0,997 g/cm<sup>3</sup> e 0,920 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Os valores foram baseados em propriedades reais obtidas a partir de medições realizadas no modelo experimental.

Para a definição das condições iniciais, como volume ocupado por cada fluido, altura e disposição inicial da interface, foram utilizadas funções polinomiais aplicadas diretamente à geometria do problema, em função da fração volumétrica, considerando 0 para água e 1 para óleo. As equações que determinam a forma inicial da interface e a condição de pressão hidrostática de um fluido sobre o outro são apresentadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente :

$$UpVFOil = step\left(\frac{(y - UpH)}{l[m]}\right) \quad (5)$$

Onde:

- *step* é uma função degrau aplicada a fração volumétrica;

- $y$  é a altura e total correspondente a placa de vidro;
- $UpH$  é a altura da coluna de água que determina a interface entre frações volumétricas.

A função degrau “step” determina a fração volumétrica 1 ou 0 até a altura do ponto  $UpH$  onde é considerada a interface. Pode-se obter uma perturbação na interface, alterando-se a condição de contorno inicial, passando-se, por exemplo, da equação de uma reta a uma equação senoidal com amplitude e número de períodos desejados, ou aplicando-se equações quadráticas.

$$UpPRES = DenOil. g. \min(UpHF - y, UpHF - UpH) + DenWater. g. (UpH - y) \times UpVFWater \quad (6)$$

Onde:

- $DenOil$  é a densidade do óleo;
- $g$  é a gravidade;
- $UpHF$  é a altura da coluna de óleo;
- $UpH$  é a altura da coluna de água;
- $DenWater$  densidade da água;
- $UpVFWater$  é a fração volumétrica da água  $1 - UpVFOil$ .
- $\min$  é uma função de mínimo múltiplo comum aplicada às frações volumétricas de modo a fornecer a pressão exercida pelas colunas de óleo e água.

A eficácia da equação pode ser observada na Figura 23, onde é possível visualizar a mudança da inclinação da reta do perfil de pressão, quando esta transpõe a interface, água e óleo, que possuem densidades diferentes.

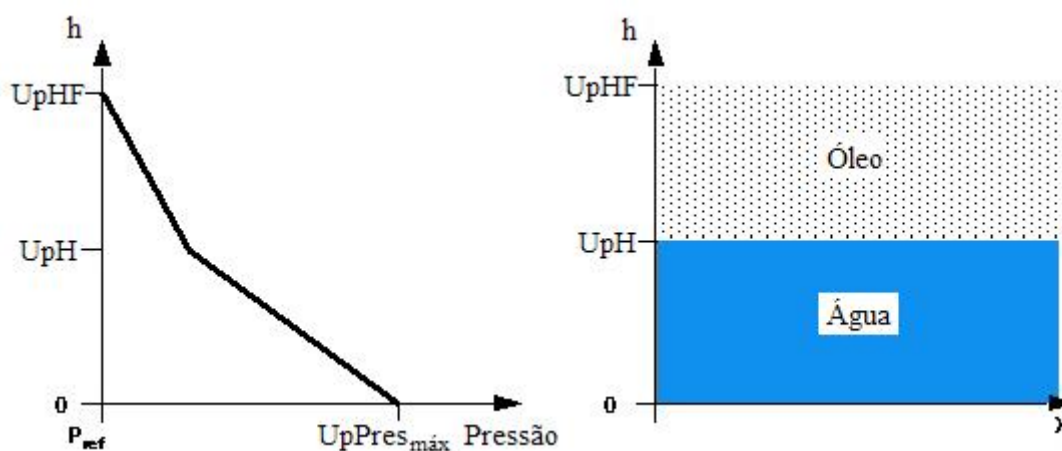


Figura 23 – Perfil de pressão hidrostática relativa às colunas de óleo e água na célula de Hele-Shaw.

Deve-se dar grande importância e destaque às condições de contorno consideradas e aplicadas ao problema de escoamento imiscível na célula de Hele-Shaw. Para melhor considerar os efeitos provocados pelas superfícies de contato, foi determinado 1 domínio composto de 5 subdomínios. Os detalhes serão comentados posteriormente. Iniciaremos pelos subdomínios paredes, entrada e saída. A parede é toda a superfície de contato sólido/fluido. Para uma melhor definição do sistema experimental foram discriminados:

- Parede E.V.A: esse subdomínio apresenta considerações da superfície de contato da borracha de E.V.A que fica entre as placas de vidro e tem o papel de conferir espaçamento e vedação para que o fluido acondicionado no interior das placas não vazze. Condições de fluidodinâmica como não escorregamento e adesividade do fluido na superfície da parede foram consideradas, sendo que o ângulo determinado para a adesividade dos fluidos nessa parede foram superiores aos ângulos de adesividade determinados para as paredes de vidro;
- Parede-*water* e parede-*oil*: estes subdomínios buscaram representar o contato dos fluidos com o vidro. Para parede *water*, é considerada a região das placas de vidro abaixo da linha de contato inicial da interface, ou seja, abaixo da cota de 0,35 m. Para parede *oil*, é considerada a porção de vidro que fica acima do contato inicial da interface, ou seja, acima da cota 0,35 m. Nestas paredes, foram determinadas propriedades de não escorregamento, com adesividade menor que a aplicada para a parede de E.V.A.;
- Subdomínio “Entrada”: para esse subdomínio, foi definida a condição de entrada do fluido, no caso água. A velocidade de entrada da água foi definida de acordo com dados obtidos do modelo experimental, sendo que a definição de uma fração volumétrica unitária indicou a injeção de água pura;
- Subdomínio “saída”: foram determinados parâmetros que dêem condições para a solução do balanço de massa, sendo que a condição de pressão na saída é dada pela equação de pressão descrita anteriormente  $Up_{Pres}$ .

A divisão da geometria em subdomínios facilita a implementação do modelo e realização das simulações, na medida em que permite representar detalhes e buscar a máxima semelhança ao modelo experimental. Além disso, todos os aspectos fenomenológicos da física dos fluidos devem ser atendidos. No “domínio” podem-se definir todas as propriedades necessárias para estipular as apropriadas condições de contorno ao problema. Inicialmente, deve-se definir o sistema como aplicação de um sistema de fluidos, selecionando como fluidos água e óleo e escolhendo o sistema de coordenadas.



No segundo passo, deve-se definir a presença e o valor das componentes gravitacionais. Define-se também a pressão de referência, de modo a se estabelecer corretamente o perfil inicial de pressão. Especial atenção deve ser dada aos erros no cálculo da pressão, principalmente quando a pressão dinâmica que impulsiona o fluxo é muito pequena em comparação com o nível absoluto de pressão. Outra definição importante para o item domínio está relacionada ao regime de movimento e regime de escoamento selecionados; estes podem variar entre estacionário ou rotacional, de acordo com a definição do escoamento, laminar ou turbulento.

Para as propriedades do sistema água/óleo, devem ser especificadas opções de multifase; pode-se dizer que para o problema abordado, a definição de simulação segundo modelo homogêneo é de grande importância.

O modelo homogêneo pode ser encarado como um caso limite de Euleriano – Euleriano de fluxos multifásicos onde a taxa de transferência de massa na interfase é muito grande. A opção de modelo homogêneo busca manter a menor taxa de transferência entre as frações volumétricas e assim preservar a definição da interface. É válido, por exemplo, no fluxo de uma superfície livre quando a interface é bem definida, mas tem limitações quanto ao caso de um fluxo muito elevado de injetado no domínio, pois não existem forças que igualem as velocidades dos fluidos em pequena escala de tempo, podendo assim ocorrer a dispersão de pequenas partículas. Para esses casos não é recomendado o modelo homogêneo.

Escolhas relacionadas ao sistema como: a consideração do modelo de flutuabilidade por diferença de densidade, a presença de dispersão ou continuidade entre as frações volumétricas, o valor do coeficiente da tensão interfacial, e o modelo de transferência de massa entre fluidos são de grande importância.

Com os comentários acima, já é possível perceber os principais itens a serem considerados no tocante às características do equipamento experimental, às propriedades dos fluidos e do sistema como um todo, bastando agora definir parâmetros de ajuste que visam aproximar ao máximo a simulação dos dados experimentais e com o menor erro numérico possível. Para isso, deve-se observar a janela *Simulation Type*. Esta janela diz respeito às condições de simulação do problema. Considera-se que o sistema é transiente, onde a simulação deve ocorrer ao longo de um tempo definido. O tempo de simulação é inserido, sendo 0 s e 7 s para o tempo inicial e final considerados, respectivamente. Deve-se levar em conta a relação “refino de malha x passo de tempo”, e então atribuir um valor para o passo de tempo. Para o desenvolvimento do modelo foram considerados valores de passo de tempo

“*Timesteps*” compreendidos entre 0,01 a 0,0001s. O passo mostra notável importância para o ajuste do modelo por estar relacionado com o critério de convergência, com a taxa residual e consequentemente com o erro numérico. Pode-se verificar que maiores passos de tempo exigem maior número de interações para convergir no limite máximo de erro aceitável. Portanto, de um modo geral, é previsível um maior erro em problemas onde o passo de tempo não se mostra adequado.

Deve-se ainda atribuir valores acessando as opções *Initialization*, *Solver control* e *Output Control*. Em *Initialization*, são definidas condições iniciais aplicáveis a todo o sistema, como perfil de pressão inicial e condição inicial de fração volumétrica, valores estes, que foram definidos por equações conforme descrito anteriormente. Em *Solver Control*, pode-se definir o critério de convergência aplicando valores máximos aceitáveis para nível residual e número de interações por passo de tempo. Na aba *Advanced Options* pode-se optar também por *Multiphase Control*, *Volume Fraction* ou *Couple*. A seleção do modo *coupled* diz respeito a uma seleção automática de melhoria numérica para cálculos de problemas de superfície livre, sendo realizado um acoplamento, não linear iterativo, nas equações de fração volumétrica, a fim de monitorar periodicamente o processo de acoplamento viscoso entre partículas do sistema. Em *Output Control* pode-se acionar a aba de *backup* e selecionar a opção automática, definida por tempo de simulação ou número de passo de tempo. Devem ser selecionadas também as variáveis a serem gravadas para posterior observação do *Post*.

Para obtenção de uma solução, envolvendo a visualização da solução numérica e gráfica do problema, são utilizados os programas *Solver* e *Post*, respectivamente. O programa *Solver* é que define as técnicas numéricas de solução com seus parâmetros para resolver os problemas físicos do modo apropriado. Os métodos numéricos definidos devem ser capazes de:

- Realizar a aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através das funções mais simples;
- Linearizar o sistema de equações algébricas resultantes;
- Definir uma estratégia de solução do sistema de equações algébricas e solucionar essas equações.

A solução ainda deve ser monitorada, a fim de se acompanhar a evolução de parâmetros como convergência e nível de erro apresentados pelo sistema de solução escolhido. Para o caso de superfície livre, conforme considerado o sistema *Hele-Shaw*, a opção de dupla precisão em cálculos deve, obrigatoriamente ser ativada devido à sensibilidade

---

dos valores numéricos, essa opção diz respeito ao aumento de casas decimais dobrando de 8 para 16 casas decimais, melhorando o critério de erro de arredondamento. A não ativação dessa opção pode acarretar erros de *roundoff* no cálculo de curvatura da interface, afetando a resposta final.

O programa *Post* refere-se à visualização da resposta da solução matemática realizada pelo programa *Solver*. Diversas formas gráficas de visualização dessa resposta podem ser utilizadas. É possível determinar vetores, curvas de nível, superfícies de transição, visualização da geometria da malha, linha de fluxo e de trajetória de partículas. Existe ainda a opção de criar animações do processo, que fornecem muitos detalhes para interpretação dos resultados, principalmente no que diz respeito à evolução do sistema. Essas apresentações são obtidas de acordo com variáveis definidas em programas anteriores. A gama de formatos possibilita que as animações ou figuras sejam exportadas para uma grande variedade de *softwares* atualmente disponíveis.

## 4 - MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é uma técnica que utiliza modelos experimentais e equações matemáticas para representar a essência de uma instalação real ou proposta sob investigação, com o objetivo de avaliar o comportamento deste sistema sob diversas condições. A Proposta CFD não é diferente, esta propõe um sistema interativo onde são aplicados valores e condições que são resolvidas ou “simuladas” por modelos matemáticos.

A simulação pode ser definida como o processo de construção de um modelo e tratamento de dados que representa o desenvolvimento e resposta, apresentada pelo sistema real. A simulação deve oferecer dados da condução de experimentos possibilitando o entendimento do comportamento do sistema, assim como a avaliação da operação do sistema. São necessários alguns parâmetros para validação e avaliação do modelo matemático, segue os principais parâmetros que devem ser analisados para validação do modelo:

- O modelo computacional deve ser capaz de descrever o comportamento físico, imitando o comportamento do sistema experimental;
- O modelo matemático deve ser avaliado e comparado ao experimental, quanto ao resultado numérico final do sistema;
- O modelo matemático deve ser capaz de apoiar teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; a ocorrência de comportamento inexplicável pode levar a não validação do modelo;
- O modelo matemático deve ser capaz de prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças nas variáveis do sistema ou em seu modo de operação;
- O modelo matemático deve ser capaz de responder a mudanças de variáveis com a mesma sensibilidade apresentada pelo modelo experimental (FONTES, 2005).

O modelo matemático deve ser capaz de oferecer todas as condições descritas acima, com o mínimo de margem de erro. Os Parâmetros de ajuste, também aceitos, podem usualmente substituir variáveis indescritíveis matematicamente, promovendo a redução do erro aplicável ao modelo. Para avaliação e validação do modelo, pode-se dizer que o principal critério é a confirmação da afinidade entre parte experimental e computacional, que deve ser a máxima possível. Assim, modelos com pouca afinidade podem e devem ser abandonados e substituídos por outros modelos mais convenientes e fiéis aos estudados experimentalmente.

## 4.1 - MÉTODO NUMÉRICO

Na atualidade, a utilização de técnicas numéricas na solução de problemas da engenharia, física, geologia, dentre outras, é uma realidade, principalmente no que diz respeito a sistemas onde soluções e análises experimentais não são suficientes para o entendimento do problema. A disponibilidade de ferramentas computacionais é cada vez maior, também o desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento facilitou a vida de estudiosos, além de possibilitar otimizações e minimizar ou acabar com as barreiras impostas às técnicas numéricas.

A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo-se as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. Quando a solução analítica não é possível ou quando há intenção de criação de um modelo computacional, a solução do problema deve ser numérica; a solução numérica sempre será obtida para um número discreto de pontos, com um determinado erro, esperando-se que, quanto menor o erro, mais próxima da solução exata estará a numérica. No caso de uma representação gráfica, quanto maior o número de pontos, mais bem definido estará o gráfico. É oportuno lembrar também que um menor número de pontos discretizados não deve distorcer ou alterar o caráter do perfil estimado. A Figura 24 - A, mostra o exemplo de uma resposta gráfica de um modelo computacional onde são apresentados gráficos com menor e maior número de pontos discretizados. Pode-se perceber que o gráfico segue o mesmo padrão, não alterando a natureza do perfil estimado, portanto um número menor de pontos discretizados pode ser aceitável para a solução do problema. A Figura 24 - B mostra uma situação semelhante, porém, percebe-se que os gráficos seguem padrões muito diferentes, portanto, o número de pontos discretizados não atende a uma estimativa correta, percebendo-se então que o erro numérico e de resposta do problema ultrapassam o limite do aceitável.

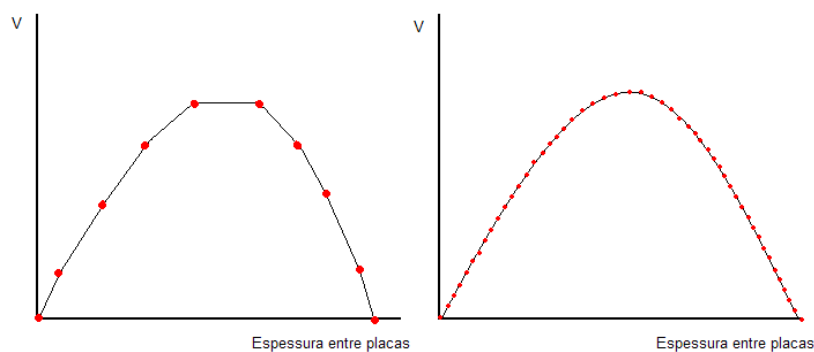


Figura 24 – A. Representação gráfica do modelo computacional onde o baixo número de pontos discretizados não altera a tendência da resposta.

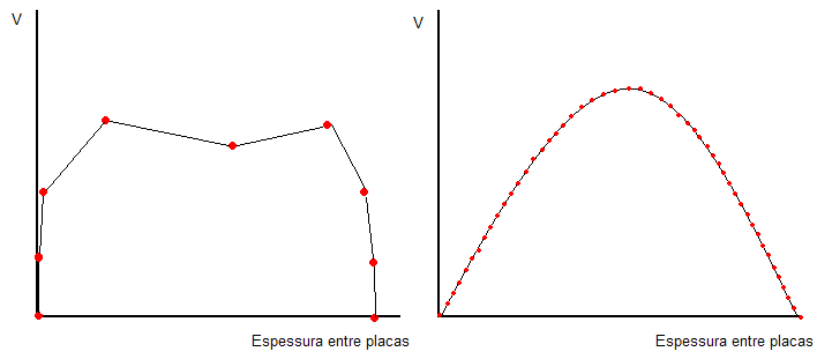


Figura 24 – B. Representação gráfica de modelo computacional com alto erro numérico devido ao baixo número de pontos discretizados.

#### 4.1.1 - Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A simulação matemática é uma ferramenta necessária para elaboração de softwares computacionais. Em grande parte de estudos de sistema multifásicos, a modelagem matemática computacional torna-se extremamente útil, já que fatores como o tempo, o número de experimentos, e a variabilidade nas condições experimentais, podem dificultar uma análise mais completa. Portanto, buscando desenvolver uma metodologia adequada para caracterizar e quantificar os padrões de escoamentos observados, passam-se a utilizar modelos computacionais de fluidodinâmica, ou Fluidodinâmica Computacional (CFD).

Fluidodinâmica Computacional (CFD) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais, usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento. A origem dessas equações de conservação é a teoria de fenômenos de transporte. Portanto pode-se dizer que CFD é o conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para predizer os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos que podem ser relacionados com a ação e a interação de mecanismos envolvendo fatores como dissipação, difusão, convecção, ondas de coque, superfícies escorregadias, condições de contorno e turbulência. No campo de escoamento de fluidos, onde se inclui problemas com superfície livre, esses fenômenos são governados pela equação de Navier-Stokes (FONTES *et al.*, 2005).

Considerando-se o estudo da interface água - óleo, e tendo em vista a necessidade de obtenção de respostas corretas para as mais diversas condições aplicadas, faz-se necessário a utilização da técnica CFD. Sua aplicação pode ser facilitada pelo conhecimento de toda a

parte experimental, detalhes de condições iniciais do processo e dados que possibilitem a tradução da condição real do experimento.

Para elaboração da metodologia de deslocamento de óleo por injeção de água em *CFD*, busca-se retratar detalhadamente os dados de geometria utilizados no procedimento experimental, propriedades de fluídos utilizados e demais condições do meio. Utiliza-se um tipo especial de sistema operacional classificado como sistema distribuído, onde vários computadores são ligados em rede (cluster) e comunicam-se através do sistema, trabalhando paralelamente como se fossem uma única máquina de grande porte, otimizando-se assim o tempo de cálculo.

### **Volumes finitos**

Em problemas envolvendo escoamentos de fluidos, é importante que a modelagem numérica atenda os princípios de conservação localmente e por todo o domínio.

O método dos volumes finitos aplicado à resolução de equações diferenciais que expressam balanços de massa, energia e quantidade de movimento para cada volume elementar do domínio discretizado, possibilita a solução de uma ampla classe de problemas.

Neste método, o domínio de cálculo é dividido em volumes de controle, que contêm nós; cada um desses nós é representado por somente um volume de controle. As variáveis são definidas no centro dos volumes de controle, e as equações são integradas sobre esses volumes para se obter uma equação discreta, que conecta as variáveis no centro do volume de controle com sua vizinhança (MALISKA, 2004).

As equações que são resolvidas possuem a mesma forma geral, dada pela equação:

$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \nabla \varphi) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) = S \quad (7)$$

Onde:

- $\rho$  é a massa específica;
- $\vec{U}$  é o vetor velocidade;
- $\varphi$  é a variável genérica;
- $\Gamma$  é o termo difusivo;
- $S$  é o termo fonte

O primeiro termo do lado esquerdo da Equação 7 é o termo temporal de acumulação que permite avançar a solução no tempo.

O segundo termo representa a parcela convectiva do balanço, sendo, do ponto de vista numérico, a de tratamento mais delicado, devido às não-linearidades.

O terceiro termo da equação trata-se do balanço dos fluxos difusivos. O último termo, à direita da igualdade, é o termo fonte, que pode acomodar parcelas adicionais.

A principal vantagem do método dos volumes finitos aplicado em *CFD* está relacionada à discretização conservativa, sendo massa e momento conservados no elemento de volume.

### Interpolação

Segundo MALISKA 2004, em caso de simulação de sistema multifásicos imiscíveis, a função de interpolação é de grande importância quanto à definição da interface entre os fluídos. Essa tem o papel de conectar os pontos nodais, local de armazenamento da variável. A tentativa é sempre utilizar uma função de interpolação com o menor erro de truncamento possível, e que não envolva muitos pontos nodais. A Figura 25 mostra a localização dos pontos no volume elementar.

As funções de interpolação podem ser associadas aos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , dependentes do número de *Peclet*, permitindo a ponderação entre a advecção e a difusão. Tomando a face leste como exemplo, os valores na interface podem ser escritos segundo as equações:

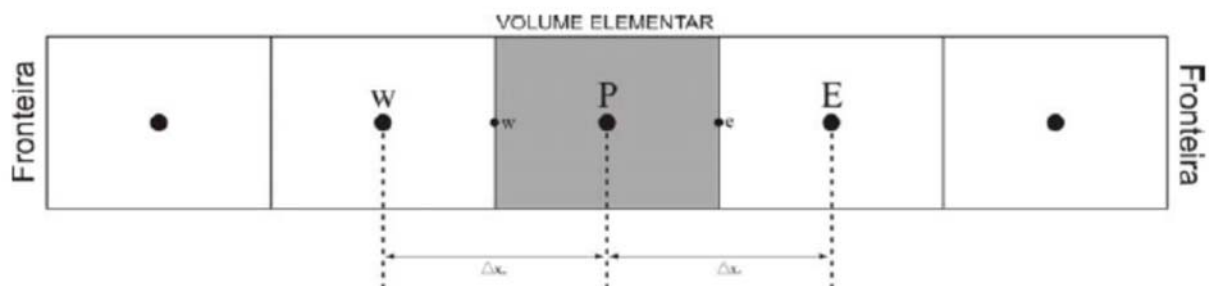


Figura 25 - Localização dos pontos da função de interpolação.

$$\varphi_e = \left( \frac{1}{2} + \alpha_e \right) \varphi_P + \left( \frac{1}{2} - \alpha_e \right) \varphi_E \quad (8)$$



$$\Gamma_e^\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \beta_e \Gamma_e^\varphi \left( \frac{\varphi_E - \varphi_P}{\Delta x_e} \right) \quad (9)$$

Existem ainda três esquemas de interpolação:

#### Esquema das Diferenças Centrais (CDS)

Este esquema usa uma interpolação linear, podendo gerar coeficientes de discretização negativos, o que não é desejável. É um esquema de segunda ordem, não robusto, portanto raramente utilizado. O valor da função na interface é obtido fazendo-se:

$$0 = \alpha \text{ e } 1 = \beta$$

O uso desse esquema de interpolação na aproximação dos termos advectivos cria, quase sempre, coeficientes negativos, pois é impossível, em problemas reais, refinar a malha até forçar sua positividade, ou seja, manter  $2 \leq Pe$  para todos os volumes elementares. (MALISKA, 2004)

#### Esquema Upwind

Ainda, segundo MALISKA (2004), o uso dessa função de interpolação evita os coeficientes negativos. É um esquema de interpolação de primeira ordem, onde o valor da função na interface é o mesmo no volume à montante, logo:

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ se } v \geq 0$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} \text{ se } v < 0$$

$$\beta = 1$$

#### Esquema WUDS (Weighted Upstream Differencing Scheme)

Para este esquema, de acordo com Raithby (1976) têm-se os seguintes valores para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , dados pelas equações:

$$\alpha = \frac{Pe^2}{10 + 2 Pe^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1 + 0,005 Pe^2}{1 + 0,05 Pe^2} \quad (11)$$

Onde:

- $Pe$  é o número de Peclet, sendo este baseado em  $\Delta x$ .

Esquemas desse tipo, onde  $\alpha$  e  $\beta$  variam no domínio de cálculo procurando “pesar” as influencias da difusão e da convecção, são chamados de esquemas híbridos (Maliska, 2004).

## 4.2 - MODELO

Diversos estudiosos já fizeram propostas experimentais que demonstram a influência de diferentes forças sobre escoamentos imiscíveis. Dentre esses estudos, pode-se destacar o modelo matemático desenvolvido por GADÊLHA (2007), onde o mesmo realizou um experimento com uma célula de Hele-Shaw de pequena espessura e girante. Nesse caso a modelagem considerou a Lei de Darcy com algumas modificações, destacando-se a importância da força de Coriolis. Pode-se citar também, no estudo realizado por FIORESE (2004), com abordagem segundo a lei de Darcy e implementação do modelo Rayleigh-Taylor que prevê uma instabilidade provocada pela força da gravidade. Os estudos citados acima apresentaram soluções matemáticas em sintonia com o respectivo estudo experimental.

Para o modelo matemático considerado neste trabalho, inicia-se pela lei da conservação da massa expressa na forma diferencial. Para um volume de controle, pode-se escrever a equação:

$$\iint \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV = 0 \quad (12)$$

A qual estabelece que

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de massa através} \\ \text{do volume de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de acumulação da massa} \\ \text{no volume de controle} \end{array} \right\} = 0$$

Onde  $\mathbf{v}$  é a velocidade do fluido,  $t$  é o tempo,  $V$  é o volume e  $\rho$  é a densidade. Admitindo-se que o volume não muda com o tempo e considerando-se as direções  $x, y, z$ , obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

No caso de escoamento incompressível, seja transiente ou não, a equação a cima se reduz a:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (14)$$

A outra equação essencial para a modelagem do escoamento sob estudo é dada por Navier Stokes, que nada mais é do que a segunda lei de Newton aplicada à movimentação de fluidos.

A equação de Navier-Stokes é de forma diferencial, tendo sido assim denominada após Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes desenvolverem um conjunto de equações que descreveriam o movimento das substâncias fluidas tais como líquidos e gases. Esta equação estabelece que mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluída são simplesmente o produto das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas, similares à fricção, atuando dentro do fluido. Esta força viscosa se origina na interação molecular e atua como gavinhas para o fluido. Esta equação, diferentemente de uma equação algébrica, não procura estabelecer uma relação entre as variáveis de interesse, em vez disto, ela estabelece relação entre a taxa de variação ou fluxos destas quantidades. Assim, para um volume de controle arbitrário, tem-se:

$$\sum F = \iint_{C.S.} \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA + \iiint_{C.V.} \rho \mathbf{v} dV \quad (15)$$

Onde se estabelece que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Soma das forças externas que} \\ \text{agem no volume de controle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo resultante de momentum através} \\ \text{da superfície do volume de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de variação de momentum} \\ \text{dentro do volume de controle} \end{array} \right\}$$

O desenvolvimento dessa equação para uma forma diferencial de Navier-Stokes, considerando fluido newtoniano, escoamento incompressível, viscosidade constante e escoamento laminar, produz uma equação vetorial compacta, abrangendo as três direções x, y e z, conforme:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (16)$$

Onde  $D$  faz referência à derivada substantiva;  $P$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade e  $g$  é o vetor aceleração da gravidade.

#### 4.2.1 - Equação de Hagen - Poiseuille

Considerando que o escoamento na Célula de Hele-Shaw é laminar e incompressível, sendo completamente desenvolvido e ocorrendo através de um canal formado por duas paredes planas paralelas com espaçamento capilar, pode-se, assim, obter a velocidade média do escoamento pela equação de Hagen-Poiseuille:

$$V = -\frac{h^2 \cdot \rho}{12\mu} \nabla \phi \quad (17)$$

O potencial de forças  $\phi$  deve ser definido individualmente para cada um dos fluidos de forma a se incluir o trabalho a ser feito contra a pressão capilar interfacial. Assim, a pressão capilar na interface entre os fluidos,  $P_c$ , no interior da célula de Hele-Shaw pode ser dada pela equação (COSKUNER E BENTSEN, 1986):

$$P_c = \gamma_{oA} \left( \frac{2}{h} + \alpha^2 \cdot \eta \right) \quad (18)$$

onde  $\gamma_{AO}$  é a tensão interfacial água/óleo;  $h$ , o espaçamento entre as placas;  $\eta$ , o comprimento alcançado pelo *finger* e  $\alpha$  uma constante de separação [ $m^{-1}$ ] dada por  $\alpha = \sqrt{\frac{1}{\eta R}}$ , sendo  $R$  o raio de curvatura do *finger* no plano da célula.

Considerando ainda a condição de incompressibilidade para os dois fluidos, e o princípio da conservação da massa, conclui-se que o potencial de velocidade satisfaz a equação de Laplace, apresentada pela equação:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (19)$$

Entra em questão a dificuldade de solução da equação devido à existência da interface que se move com o tempo e ainda envolve uma forma funcional desconhecida.

Para simplificar a discussão, vamos nos concentrar na situação em que a diferença de viscosidade entre os dois fluidos é muito grande ( $\mu_2 \gg \mu_1$ ). Assim, sabe-se que ao se injetar o

fluido 1 (menos viscoso) no fluido 2 (mais viscoso) a interface torna-se instável. Porém, ao se inverter o sentido do fluxo, ou seja, ao se injetar o fluido mais viscoso contra o fluido menos viscoso, obtém-se uma situação estável com ausência da instabilidade de *Saffman-Taylor*. À primeira vista, tal situação pode causar um certo espanto, visto que a única diferença entre estes dois casos descritos é o sentido do fluxo. Tendo em vista a forma arredondada da interface entre os fluidos, considerados incompressíveis, pode-se concluir que a relação entre o campo de pressão e tensão obedece à equação de Laplace. Desta forma, no fluxo do fluido mais viscoso deslocando o menos viscoso, percebe-se a presença de um gradiente de pressão intenso no fluido mais viscoso (fluido 2), enquanto que o gradiente de pressão no fluido menos viscoso (fluido 1) é muito menos intenso. Na verdade, o campo de pressão no fluido menos viscoso pode ser considerado como aproximadamente constante. Ou seja, quando o fluido mais viscoso empurra o fluido menos viscoso, a perturbação encontra uma espécie de “barreira” que se opõe à instabilidade. Tal oposição à instabilidade é provocada pela ausência de um gradiente de pressão (pressão constante) no fluido menos viscoso, resultando assim numa situação estável para o problema de *Saffman-Taylor*. Diferentemente, quando o fluido menos viscoso desloca o mais viscoso, uma dada perturbação na interface tende a aumentar (já que no fluido menos viscoso o gradiente de pressão aumenta), levando à instabilidade da interface (GADÊLHA, 2007).

#### 4.2.2 – Condição inicial e Condições de contorno

Dentre as prioridades atuantes no sistema destacam-se a tensão superficial e o acoplamento viscoso entre as fases, visto serem de fundamental importância para o estabelecimento das condições de contorno que acabarão por definir o modelo a ser resolvido.

##### Condição na interface e nas paredes

Dentre as condições impostas ao sistema, é importante destacar a condição inicial de partida da interface, assim como a condição de contorno aplicada às paredes do sistema, cumprindo destacar que essas buscam reproduzir as condições aplicadas ao modelo experimental.

A condição inicial da interface água – óleo consiste em uma interface horizontal distribuída uniforme e perpendicularmente ao plano em que se encontram as placas, com ângulos de contato de  $100^\circ$  e  $135^\circ$ , correspondentes ao vidro e ao E.V.A., respectivamente, e velocidade inicial igual a 0 cm/s. Nos experimentos, essa condição inicial é obtida apenas de

forma aproximada, dadas as imperfeições e pequenas perturbações na acomodação da interface.

As condições de parede seguem o modelo básico de escoamento de fluidos, onde a velocidade na parede é igual à zero. Esta condição foi admitida, pela seleção da opção “No Slip”, existente no formulário do subdomínio PAREDE. Quando definida a condição “No Slip”, percebe-se a abertura de uma caixa onde se devem determinar os valores do ângulo entre o fluido primário (água) e as paredes. Os valores dos ângulos foram obtidos através de um experimento realizado em uma pequena cuba de vidro, onde, com auxílio de um transferidor, foi possível realizar a medição dos ângulos de contato água-óleo e vidro ( $100^\circ$ ), água-óleo e E.V.A. ( $135^\circ$ ).

### Tensão superficial

O sistema de equações da interface usado pelo software (CFD) baseia-se no modelo de BRACKBILL *et al.* (1992). Neste modelo a tensão superficial atua como uma força por unidade de volume concentrada na interface, ao invés de uma superfície tensionada. A Figura 26 considera uma interface livre com dois fluidos, o “Fluido Primário,  $\alpha$ ” representa o fluido mais denso, o “Fluido Secundário,  $\beta$ ” representa o fluido menos denso, o vetor  $n$  é o vetor normal à interface, que em movimento pode ser associado à força de empuxo,  $\theta$  é o ângulo de contato entre a parede lateral e a interface entre os fluidos, relacionado à adesividade com a referida parede. O ângulo é estabelecido a partir da parede na porção do fluido primário.

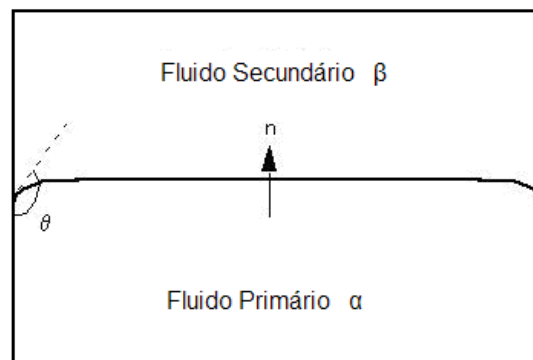


Figura 26 – Representação plana do ângulo de contato e força de empuxo entre dois fluidos.

Seguindo a definição para o fluido primário ( $\alpha$ ) e secundário ( $\beta$ ), sendo normalmente o fluido primário considerado o mais denso e o secundário o menos denso, assume-se que a tensão superficial é dada pela continuidade de força superficial conforme a equação:

$$F_{\alpha\beta} = f_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (20)$$

Onde:

$$f_{\alpha\beta} = -\gamma_{\alpha\beta} \cdot k_{\alpha\beta} \cdot n_{\alpha\beta} + \nabla_s \gamma_{\alpha\beta} \quad (21)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha\beta}| \quad (22)$$

onde  $\gamma_{\alpha\beta}$  é o coeficiente de tensão superficial,  $n_{\alpha\beta}$  é o vetor normal à interface apontando do fluido primário para o fluido secundário,  $F_{\alpha\beta}$  é a tensão força superficial do fluido mais viscoso,  $\nabla_s$  é o operador gradiente sobre a tensão interfacial e a curvatura da superfície é definida pela equação:

$$k_{\alpha\beta} = \nabla \cdot n_{\alpha\beta} \quad (23)$$

Os dois termos no lado direito da Equação 21 representam as componentes normal e tangencial da tensão superficial, respectivamente. A componente normal resulta da relação de curvatura obtida pelo raio de curvatura  $r_{\alpha\beta}$  e a componente tangencial provém da variação do coeficiente de tensão superficial.

O termo  $\delta_{\alpha\beta}$  é muitas vezes chamado de função delta onde o valor da tensão é nulo quando afastado da interface, garantindo assim que a tensão superficial atue apenas perto da interface. Quando a interface entre os dois fluidos entra em contato com uma parede, é possível definir a aderência da parede, especificando o ângulo de contato existente entre a interface e a referida parede.

### Acoplamento viscoso

Considere-se uma partícula discreta viajando em meio a um líquido de propriedades médias. As forças agindo sobre a partícula que afetam a aceleração das demais partículas são devido à diferença de velocidade entre as partículas e o fluido, bem como pelo deslocamento do fluido pela partícula. A equação do movimento da partícula foi obtida por Basset, Boussinesq e Oseen, podendo ser colocada na seguinte forma:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_P \quad (24)$$

Onde:

- $V_p$  : velocidade da partícula;
- $F_D$  : força de arraste atuante agindo sobre a partícula;
- $F_B$  : flutuabilidade devido à gravidade (empuxo);
- $F_R$  : forças devido ao movimento de rotação (forças centrípetas e Coriolis), no estudo proposto essa força não deve ser considerada;
- $F_{VM}$  : força de aceleração do volume de massa ocupado pelas partículas;
- $F_p$  : força aplicada sobre a partícula, devido ao gradiente de pressão no fluido em torno das partículas;

A equação descrita acima considera que um fluido afeta o movimento das partículas através do arraste viscoso e existe uma diferença de velocidade entre as partículas e fluido. Inversamente, há uma contra influência da partícula sobre o líquido viscoso devido ao arraste. Este efeito é denominado acoplamento entre as fases. O fluxo líquido pode ser calculado independentemente da trajetória das partículas.

### 4.3 - ERRO NUMÉRICO

Os erros podem ser considerados como a diferença entre a solução exata do problema e a solução proposta pelo modelo numérico. Um modelo numérico com alto nível de erro, difusão numérica ou oscilação numérica, pode invalidar todo um trabalho de modelagem matemática. Se observada uma falta de veracidade de uma solução numérica em relação a respostas experimentais ou coleta de dados, o modelo numérico deve ser descartado.

Diversos procedimentos numéricos são aplicados para manter o erro a um nível aceitável. Para cada tipo de proposta computacional, o sistema considera um grupo de equações que visam minimizar o erro tanto quanto possível. A expressão relativa ao erro pode ser dada segundo a equação:

$$E_s = \frac{f_{exact} - f_{numeric}}{f_{exact}} \quad (25)$$

Onde,  $E_s$  é o erro de solução,  $f_{exact}$  é a solução exata e  $f_{numeric}$  é a solução numérica.



---

A solução numérica de uma equação diferencial, por ser discreta, possui erros de aproximação que a distanciam da solução exata. Esses erros, denominados erros de truncamento (ET), podem ser determinados utilizando-se a expansão em série de Taylor da função em torno de um ponto para obter as expressões numéricas das derivadas do operador diferencial. Portanto o erro de truncamento de uma aproximação numérica depende, logicamente, da ordem da aproximação escolhida para as derivadas do operador diferencial.

Assim, uma forma de interpretar a difusão numérica é a partir de observações do erro de truncamento das aproximações por série de Taylor. Sabe-se que funções de interpolação não exatas dão origem aos erros de truncamento. Tais erros, quando associados aos termos advectivos, podem ser classificados em dissipativos ou não dissipativos e originam, respectivamente, a difusão numérica e a oscilação numérica.

É mais consistente, então, definir a difusão numérica como os erros de truncamento de natureza dissipativa, associados aos termos advectivos, causados pelo fato da função de interpolação não ser exata. É lógico que, em problemas bi e tridimensionais complexos, não existe a possibilidade de usar funções de interpolação exatas, pois esta só é possível após o conhecimento da solução do problema. Logo, os problemas sempre estarão contaminados de difusão numérica, se houver aproximação dos termos advectivos por esquemas dissipativos. Sabe-se que é possível tentar minimizar essa difusão, criando funções de interpolação o mais próximas possível da solução do problema físico a ser resolvido.

É de notável importância o conhecimento de que nos casos de problemas de condução, existem sim, erros de truncamento, pois a função de interpolação não é exata, mas eles não dão origem à difusão numérica nem a oscilações numéricas. É por isso que não se encontra dificuldades para resolver numericamente um problema bi ou tridimensional de condução pura usando diferenças centrais. Já para problemas de convecção dominante bi e tridimensionais, a difusão numérica acentua-se. Exatamente porque as funções de interpolação unidimensionais afastam-se demais da função de interpolação exata.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Capítulo a seguir busca apresentar e discutir todos os resultados, experimentais e computacionais, obtidos. O estudo experimental busca estabelecer parâmetros para avaliação do modelo computacional; outro objetivo, com a realização de um planejamento experimental é a definição das condições favoráveis à formação de *fingers*, assim como a definição dos níveis de sensibilidade dos fatores estudados. A validação do modelo CFD proposto é feita sobre observações experimentais realizadas, características gerais do processo de bombeamento, assim como sobre a correta previsão do volume de óleo em atraso e a eficiência do deslocamento, sendo todos esses aspectos de fundamental importância para a conclusão do trabalho.

### 5.1 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O estudo experimental possibilitou importantes avaliações. Inicialmente, pela realização de uma análise visual e matemática por tratamento de imagem de cada fotografia do sistema, foi possível observar que a área em atraso relaciona-se diretamente com o desenvolvimento dos *fingers*, mostrando que quanto maior o *finger* formado, maior a área em atraso no processo de bombeamento. Observou-se uma tendência de inflamento com redução na largura da base e aumento do corpo do *finger*, como é mostrado na Figura 27.



Figura 27 – Foto com detalhes dos *fingers* e correspondente digitação viscosa

A Tabela 3 mostra a matriz do planejamento fatorial parcial  $2_{IV}^{4-1}$  e as respostas obtidas para cada ensaio.

Tabela 3 - Matriz do Planejamento fatorial parcial  $2_{IV}^{4-1}$  com suas respectivas respostas.

<i>Ensaio</i> <i>Experimentais</i>	<i>Ângulo</i> <i>(°)</i>	<i>Distância</i> <i>entre as</i> <i>placas (mm)</i>	<i>Concentração de</i> <i>NaCl (% p/v)</i>	<i>Vazão</i> <i>(mL s<sup>-1</sup>)</i>	<i>Resposta</i> <i>Área de</i> <i>atraso(cm<sup>2</sup>)</i>
1	5	1,1	0	1,52	492,51
2	45	1,1	0	2,38	336,59
3	5	3,0	0	2,38	148,4
4	45	3,0	0	1,52	160,23
5	5	1,1	6	2,38	384,97
6	45	1,1	6	1,52	329,06
7	5	3,0	6	1,52	33,34
8	45	3,0	6	2,38	56,99
9	15	2,3	3	1,72	197,87
10	15	2,3	3	1,72	127,97
11	15	2,3	3	1,72	112,91

Através dos resultados da Tabela 3, foram calculados os efeitos das 4 variáveis estudadas em relação à resposta do experimento (Tabela 4), podendo verificar um desvio padrão correspondente a 45,34 cm<sup>2</sup>. A Tabela 6 apresenta a análise de variância, ANOVA, de cada fator do sistema, obtida a partir do planejamento experimental proposto. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,9176. Pode-se observar pela Tabela 4 que todos os fatores mostraram efeito negativo sobre o volume dos *fingers*, isto é, diminuíram o volume quando passaram do nível - 1 ao +1, porém somente a distância entre as placas mostrou efeito estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ), diminuindo a área observada dos *fingers* quando passou de 1,1 a 3,0 mm, confirmando uma relação inversamente proporcional quando relacionada à área em atraso. O efeito significativo da distância entre as placas pode ser explicado pela ação da capilaridade: quanto menor a distância entre as placas, maior a ação da capilaridade atuante no sistema. Essa propriedade age sobre a interface favorecendo o desenvolvimento da digitação viscosa; deve-se considerar que a ação da capilaridade está diretamente ligada à viscosidade e molhabilidade dos fluidos. No sistema estudado, percebe-se que o deslocamento

da fase água é favorecido por apresentar menor viscosidade. Observa-se também que a largura dos *fingers* de água é sempre maior do que a dos *fingers* de óleo (Figura 28), sendo essa geometria decorrente da aplicação de uma força externa necessária ao bombeamento e que se opõe à força da gravidade. Quando temos apenas a ação da força da gravidade, como no caso da inversão de fases (água inicialmente na região superior e óleo por baixo), essa geometria é alterada, passando a ter *fingers* de água mais estreitos do que os de óleo.

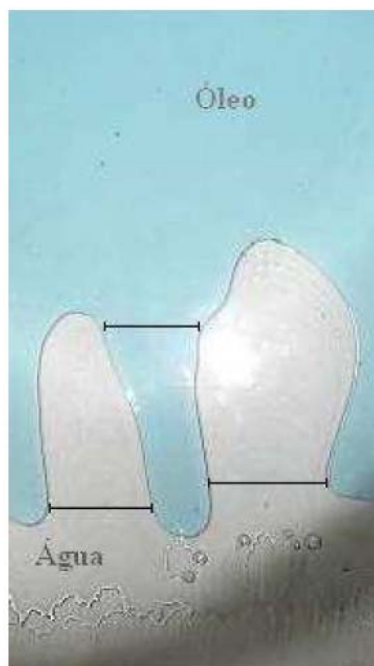


Figura 28 – No bombeamento a largura na base dos *fingers* de água é sempre maior do que nos *fingers* de óleo.

Tabela 4 - Efeitos estimados e respectivos índices estatísticos, em negrito o efeito mais significativo.

	<i>Efeito</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>p</i>	<i>Limite de Confiança</i>	<i>Limite de Confiança</i>
				-0,95%	+0,95%
Média	0,469	0,030	0,004	0,339	0,598
Ângulo (A)	-0,075	0,071	0,401	-0,379	0,229
<b>Distância (D)</b>	<b>-0,606</b>	<b>0,071</b>	<b>0,013</b>	<b>-0,910</b>	<b>-0,302</b>
Concentração de NaCl (C)	-0,162	0,071	0,149	-0,466	0,142
Vazão (V)	-0,026	0,071	0,744	-0,331	0,278

Tabela 5 - ANOVA da área em atraso.

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	$F_{v1, v2}$ calculado	$F_{v1, v2}$ tabelado
Regressão	0,800071	4	0,200018	8,00	4,53
Resíduos	0,149953	6	0,024992		
Falta de Ajuste	0,129954	4	0,032488	3,25	19,25
Erro Puro	0,020000	2	0,010000		
<b>Total</b>	<b>0,950024</b>	<b>10</b>			

A Tabela 5 mostra a análise de variância onde a regressão é significativa ( $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ ), e a falta de ajuste e erro puro desprezíveis, pois  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$ . A máxima variação explicada foi de 84,21 % enquanto a máxima variação explicável foi de 97,89 %.

O modelo matemático encontrado é dado pela Equação (30) (modelo linear), e a Figura 29 mostra os valores observados *versus* os valores preditos pelo modelo matemático e a região para previsão com nível de confiança de 95% é delimitada pelas linhas tracejadas vermelhas.

$$Y = 0,4687 - 0,0374 A - 0,3031 E - 0,0809 C - 0,0132 V \quad (26)$$

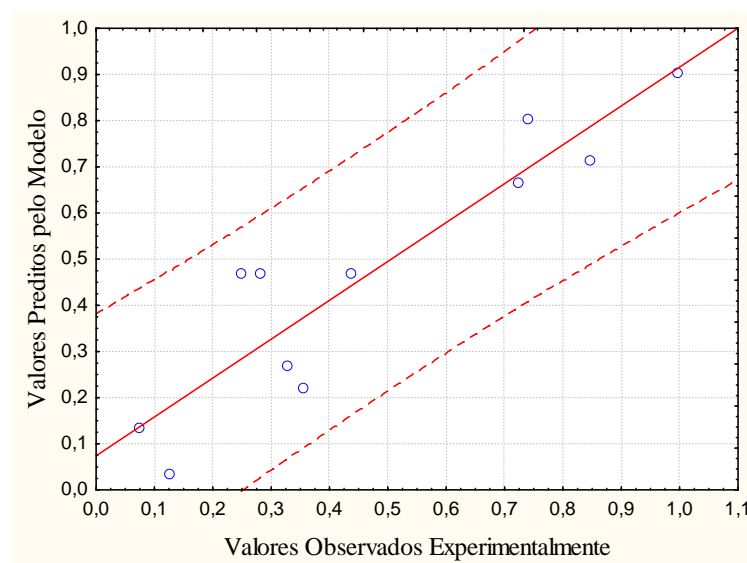


Figura 29 – Valores observados x valores preditos pelo modelo.

A Figura 30 mostra os perfis dos valores preditos pelo modelo para a área de atraso do óleo gerado pelo modelo linear (Equação 26). A Figura 31 apresenta área de óleo em atraso em função da Concentração de NaCl e Distância entre as Placas, que se mostram como fatores mais sensíveis para o aparecimento de *fingers*.

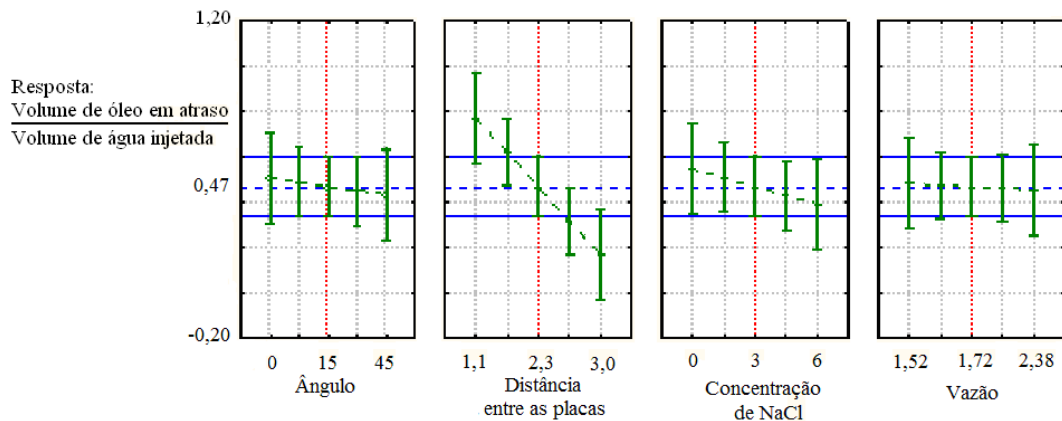


Figura 30 – Resposta do sistema para os quatro efeitos testados.

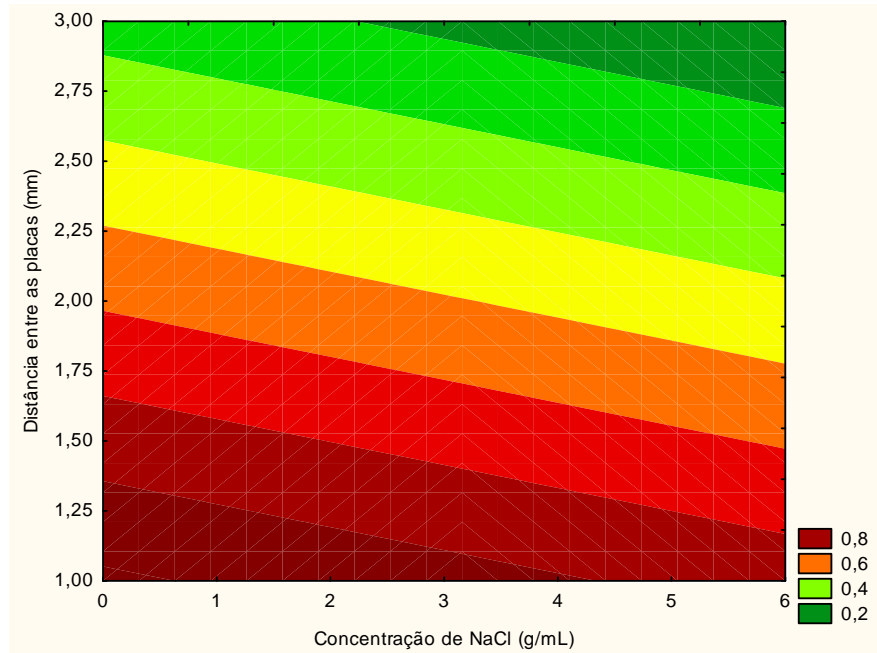


Figura 31 - Área de óleo em atraso em função da Concentração de NaCl e Distância entre as Placas.

A região da condição de processo encontrada para a obtenção de um mínimo de área de atraso do óleo foi de distância entre as placas de 2,75 e 3,0 mm e concentração de NaCl de 2,8 a 60 % p/v, conforme observado na Figura 31. Os fatores Ângulo e Vazão apresentam

pouca influência na resposta em estudo, conforme observado na Figura 30. Este fato pode ser comprovado pela reduzida declividade no comportamento das respostas previstas.

## 5.2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Tendo em vista os resultados dos ensaios experimentais, o modelo computacional apresentou respostas adequadas para os valores das propriedades e parâmetros considerados para simulação. Essas observações são capazes de certificar a validade do modelo, por apresentar comportamentos semelhantes aos observados experimentalmente e descritos em outros trabalhos científicos. Por meio de indução para confirmação de efeitos teóricos previamente estudados, o modelo também apresentou as respostas esperadas.

Alterações nas condições operacionais e de contorno como força gravitacional, velocidade de injeção de fluídos, adesividade das paredes e propriedades como densidade, viscosidade dos fluídos e tensão interfacial também foram testadas. Estes testes foram realizados a fim de estudar o comportamento da resposta ao nível da interface no processo de deslocamento de óleo por meio da injeção de água.

Inicialmente foram realizadas simulações onde foi estudada a influência da adesividade da parede. Foram mantidos todos os valores que representam as condições do problema, alterando-se somente a angulação do contato entre interface água/óleo e paredes, que representa a adesividade, conforme formulário apresentado na Figura 32.

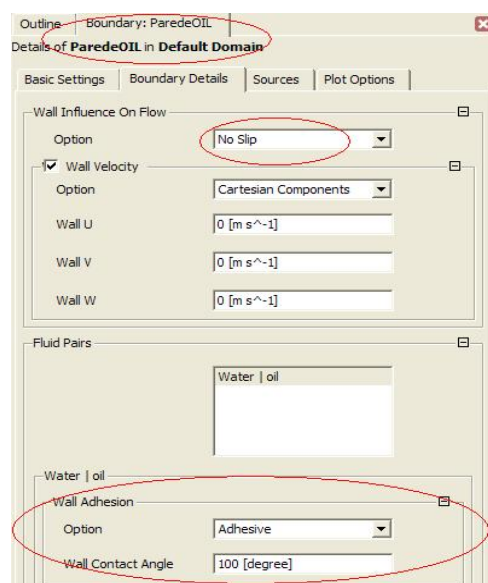


Figura 32 – Formulário onde se vê a entrada de parâmetros relacionados com a condição de parede e adesividade.

Após a realização de simulações com alteração exclusiva da adesividade, observou-se que, quando aplicado o valor de  $90^\circ$  graus, a interface sofre pouca deformação no decorrer da simulação, pois nesse caso a resistência ao escoamento oferecida pela parede na interface dos dois fluidos é igual para ambos, portanto, nenhum princípio de instabilidade é gerado a partir desse ponto, ao menos na direção perpendicular às placas.

As perturbações geradas pela alteração da adesividade são de fundamental importância para o desenvolvimento da instabilidade. A adesividade é estabelecida através de valores aplicáveis ao ângulo de contato da interface entre os dois fluidos e as placas, conforme Figura 33. O ângulo é estipulado do lado do fluido primário. Como se tem considerado a água como fluido primário, deve-se aplicar valores maiores que  $90^\circ$ , pois considerou-se que o óleo em deslocamento molha mais a superfície do vidro do que a água.

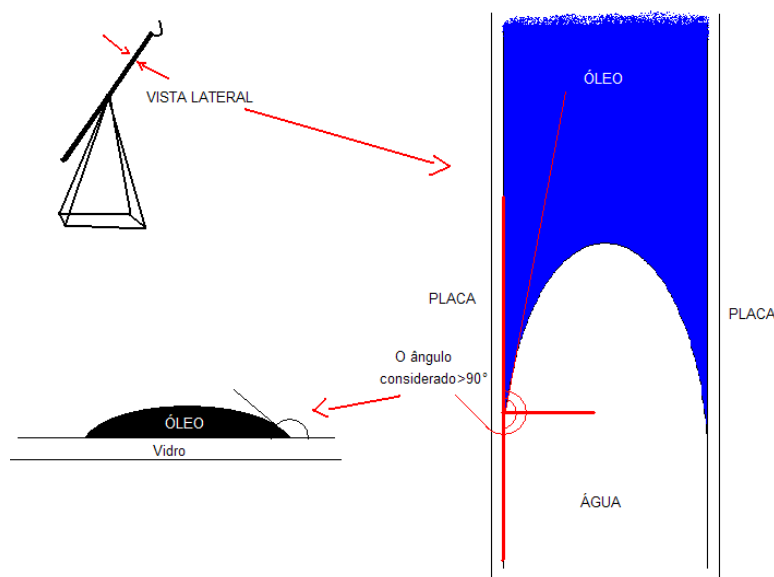


Figura 33 – Esquema mostrando o ângulo de contato entre a interface dos fluidos e as placas da célula.

O valor dado para o ângulo de contato deve levar em conta as condições experimentais de molhabilidade e tensão interfacial do fluido. A correta escolha da adesividade nas paredes das placas aproxima o modelo matemático ao experimental e atesta a importância dessa propriedade física para o escoamento água/óleo nesse sistema. A correlação da adesividade a outras propriedades dos fluidos, como tensão interfacial e molhabilidade é desejável para uma modelagem realística do sistema Hele-Shaw aplicado a escoamentos imiscíveis.

Concluiu-se que nos casos onde são consideradas forças de adesividade, a tensão interfacial se mostra mais sensível na medida em que pequenas alterações (cerca de  $0,02 \text{ N/m}$ ) no seu valor podem produzir grandes modificações no comportamento do sistema.



Uma representação 3D da interface, Figura 34, possibilita a visualização da discretização da espessura da placa que é dividida em 11 camadas. Considerações como a ação da adesividade do fluido à parede, assim como a concavidade formada pela ação das paredes podem ser melhor observadas devido à discretização com 11 volumes de controle. Ao se ampliar uma região, pode-se verificar que os perfis ao nível da interface água/óleo são curvos na direção perpendicular às placas devido à força de adesividade sobre os fluidos imposta pelas paredes.

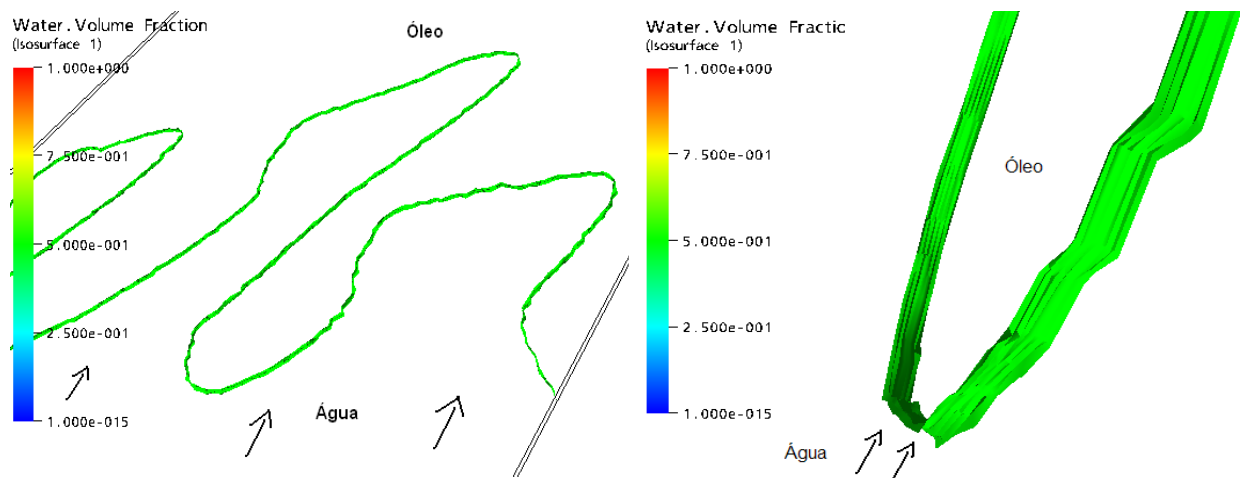


Figura 34 – Representação 3D da interface água/óleo na célula de Hele-Shaw para um escoamento instável.

Uma vez comprovada a importância da escolha de um valor adequado para a adesividade, a fim de se obter uma reprodução realística do sistema experimental, foram realizados testes de sensibilidade sobre a tensão interfacial do sistema. Para isso foram mantidos todos os demais valores das propriedades e parâmetros, alterando-se somente o valor da tensão interfacial.

Mesmo com a utilização do modelo euleriano, que busca manter a continuidade da interface, verificou-se que para tensões interfaciais com valor muito abaixo daqueles de origem experimental, a interface se perturba rapidamente tornando-se indefinida, podendo ser considerada como um sistema disperso, conforme a Figura 35.

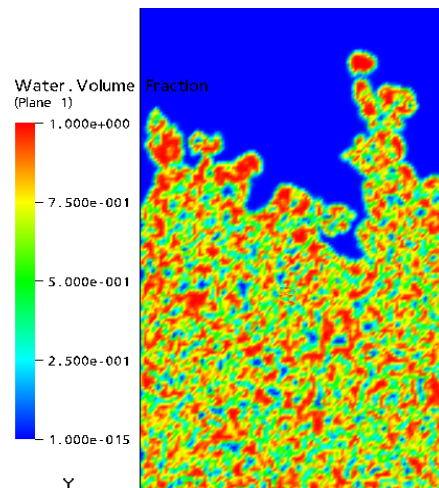


Figura 35 – Um resultado de simulação com baixo valor para a tensão interfacial.

Para valores de tensão interfacial próximos ao experimental, observa-se uma melhor definição da interface; o programa de simulação CFD representa a região de transição na interface mais estreita ou mais larga de acordo com o valor da tensão interfacial aplicada, conforme apresentado na Figura 36 A e B. Também foi observada menor quantidade de óleo retida devido a baixa aderência nas paredes quando se aplicou maior valor de tensão interfacial, e maior retenção de óleo (manchas amarelas na região vermelha) quando se considerou menores valores de tensão interfacial. Percebe-se ainda que pequenas alterações na tensão interfacial, em cerca de  $\pm 0,02$  N/m, afetam a quantidade de resíduos decorrentes da adesividade na parede, confirmando assim, a questão de sensibilidade suscitada anteriormente. Deve-se destacar que esses resíduos de óleo simulados podem também ser observados experimentalmente, conforme mostrado na Figura 37.

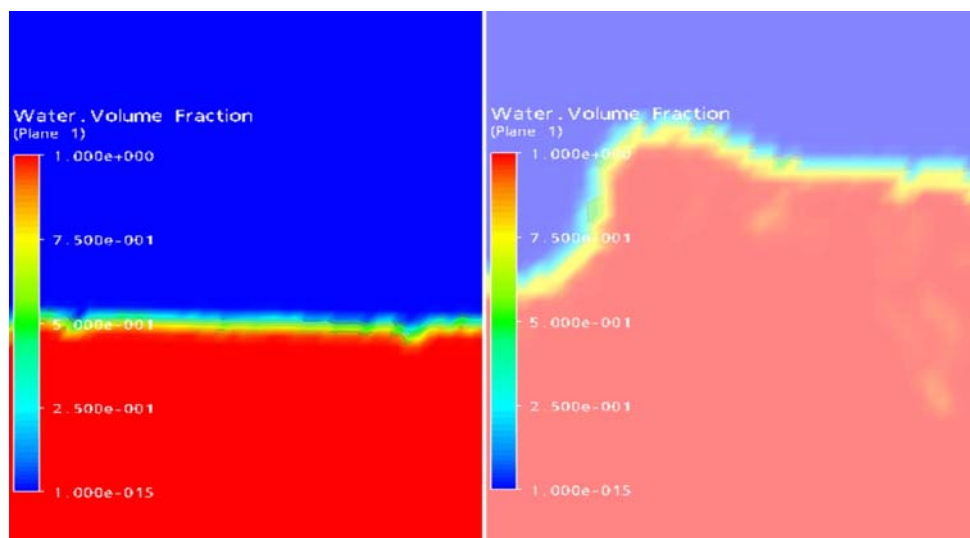


Figura 36 - A - Definição da interface com tensão = 0,126 N/m; B – com tensão = 0,095 N/m

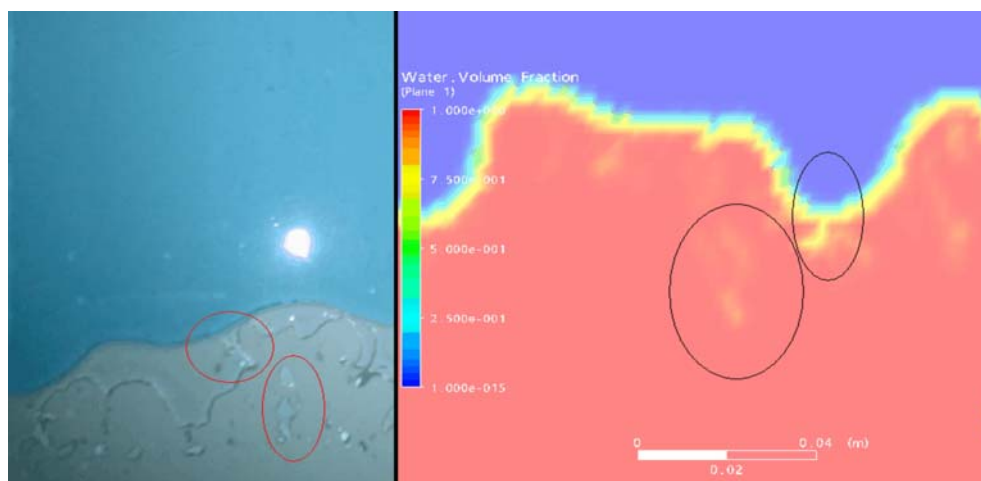


Figura 37 - Semelhança de características físicas entre experimento e simulação.

A fim de certificar que os resíduos de óleo agarrados à placa de vidro guardam relação apenas com a tensão interfacial e aderência dos fluidos na parede, e não com uma possível transferência de massa entre os fluidos, checaram-se minuciosamente as condições de contorno aplicadas à interface líquido-líquido. Constatou-se que os modelos que facilitariam a transferência de massa entre as frações volumétricas estavam todos desativados.

Segundo informado pelo tutorial do *software*, “Não é possível atribuir propriedades de transferência de massa entre componentes cujas frações são determinadas algebricamente, ou a partir de uma equação, a não ser que em *Mass Transfer* a opção *Sum Species Mass Transfer* esteja selecionada.” Com isso, confirma-se que nenhum efeito de transferência de massa pode ser responsável pela perda de definição da interface, mas que por outro lado, alterações na tensão interfacial repercutem sobre a espessura dessa interface.

Para testes realizados com tensões interfaciais muito altas, foi observado que, mesmo com grandes refinamentos de malha e menores passos de tempo, a simulação não avança; o programa de *SOLVER* não consegue realizar os cálculos matemáticos e envia uma resposta de *OVERFLOW*. Isso indica que o algoritmo de solução apresenta restrições para a convergência dos cálculos matemáticos. Quando se considera o aspecto fenomenológico do problema, verifica-se que o aumento brusco na tensão interfacial produz um aumento na resistência de deslocamento dos fluidos, travando o fluxo de entrada e inviabilizando o escoamento. Portanto, a falta de convergência observada encontra eco na expectativa experimental.

Com o modelo computacional é possível analisar situações experimentais como a natureza dos padrões de formação dos *fingers*. Através de simulações do escoamento

água/óleo, pode-se observar a competitividade dos *fingers*, assim como a semelhança das formas e a evolução dos mesmos, que quando comparados às observações experimentais apresentam diversas semelhanças.

As Figuras 38 - A e B, mostram a competitividade entre os *fingers*. A Figura 38-A esquematiza cálculos da área dos *fingers* realizados por Maworthy (1986). Nessa figura podemos observar um estado avançado de competição entre *fingers*, onde os dedos denominados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 são dominantes e mostram-se mais desenvolvidos que os denominados como I, II, III, IV e V. Na resposta gráfica da simulação realizada, Figura 38-B, pode-se observar, embora menos intenso, o mesmo fenômeno de competitividade entre *fingers* onde os dedos dominantes, 1 e 2, começam a se destacar dos demais.

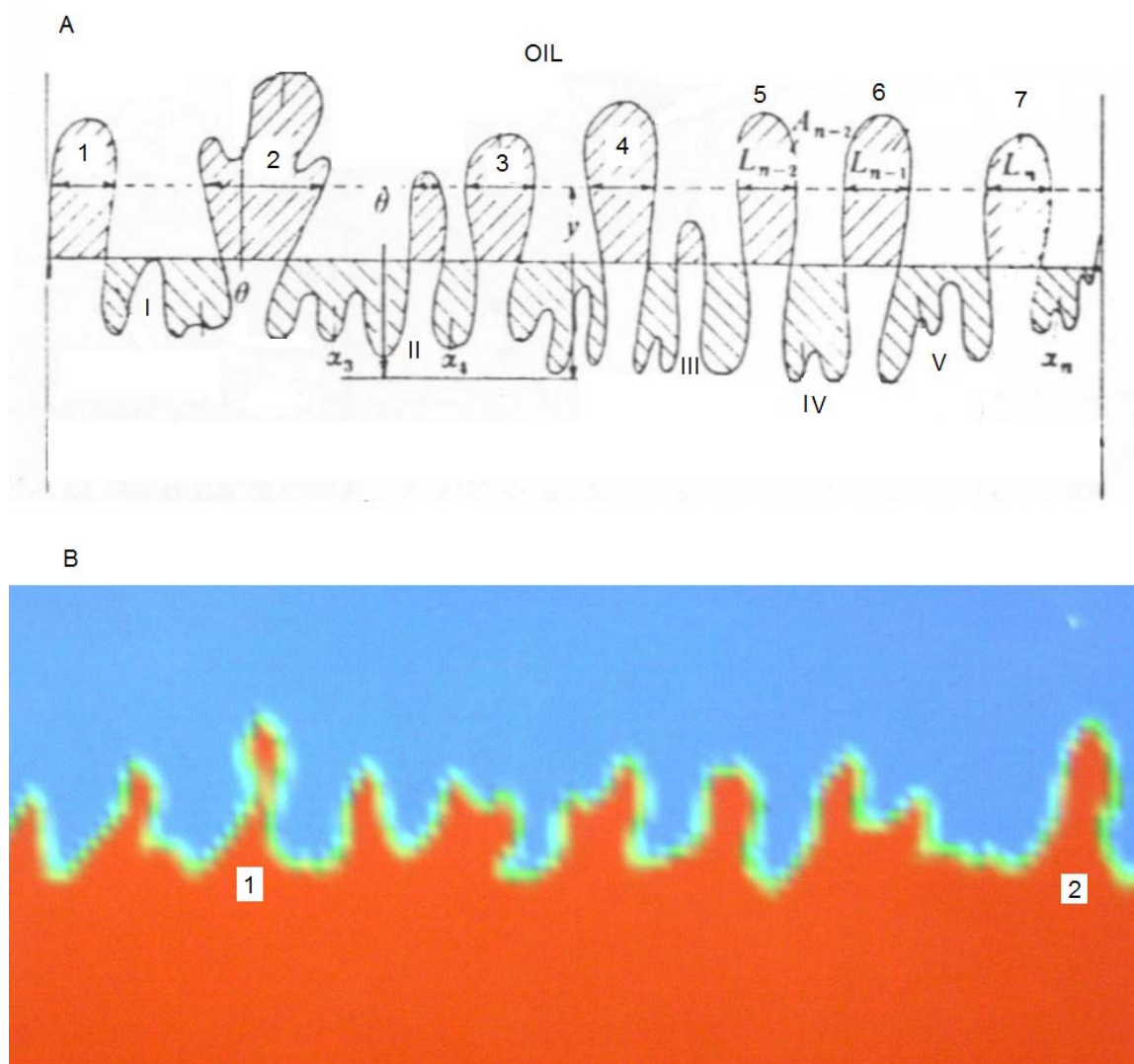


Figura 38 – Competitividade entre *fingers*; A – Visão crítica sobre figura de *fingers* Mawhorty (1986), apresentação da competitividade; B – Competitividade observada por simulação computacional.

A Figura 39 apresenta o comparativo entre padrões de um par de *fingers* observado experimentalmente e o correspondente computacional. Aspectos geométricos como largura, base e topo dos *fingers* são apontados tanto na fotografia de origem experimental como na simulação computacional.

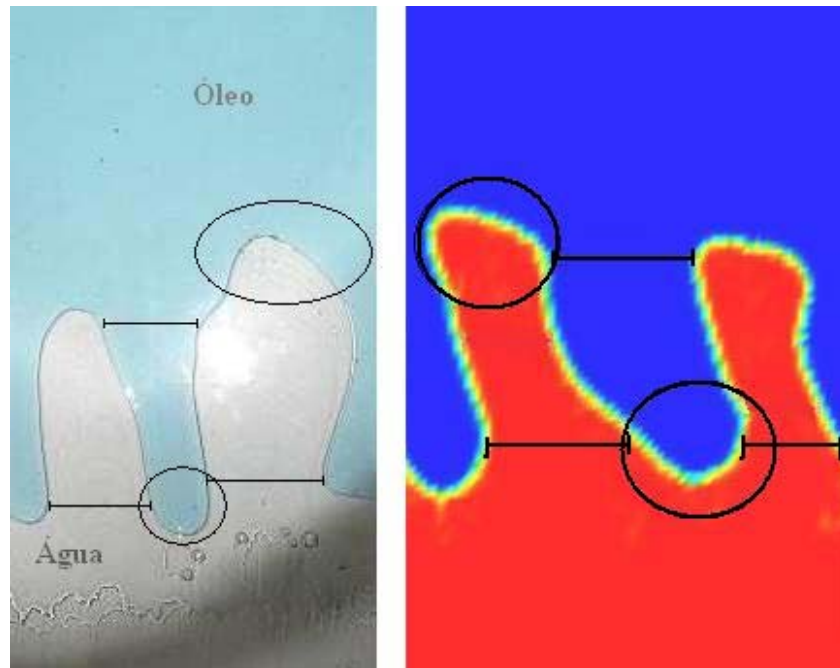


Figura 39 – Comparativo entre padrões de um par de fingers obtidos experimentalmente e por simulação computacional.

Vários aspectos visíveis nas simulações já trazem características próximas ao modelo experimental, porém, não basta a semelhança geométrica. A resposta às variações nas condições iniciais, a correspondência no valor da área de óleo em atraso, a cinética do desenvolvimento dos *fingers* devem ser semelhantes ao observado experimentalmente. Com a verificação e confirmação de semelhança entre esses aspectos, pode-se ter a comprovação de que as respostas obtidas nas simulações são de natureza inteiramente física e não provocada por erro numérico.

Altas taxas de erro residual podem afetar a repetibilidade de uma mesma simulação. Sabe-se que para um sistema laminar, como o considerado, as respostas de uma mesma simulação deveriam ser as mesmas, mantidas a mesma condição inicial e demais disposições do modelo. O fato de serem obtidas respostas diferentes para as mesmas condições de simulação, conforme observado nos quadros das Figuras 40 e 41, pode ser explicado pela diversidade de máquinas presentes no *cluster* e possíveis alterações no partilhamento das

operações de cálculo de um evento para outro, o que pode provocar diferenças significativas se a cada operação o erro numérico residual for grande. Percebe-se nessas figuras que as formações se assemelham, porém considerando que o regime é laminar, percebe-se que a taxa residual de erro afetou a solução do problema.

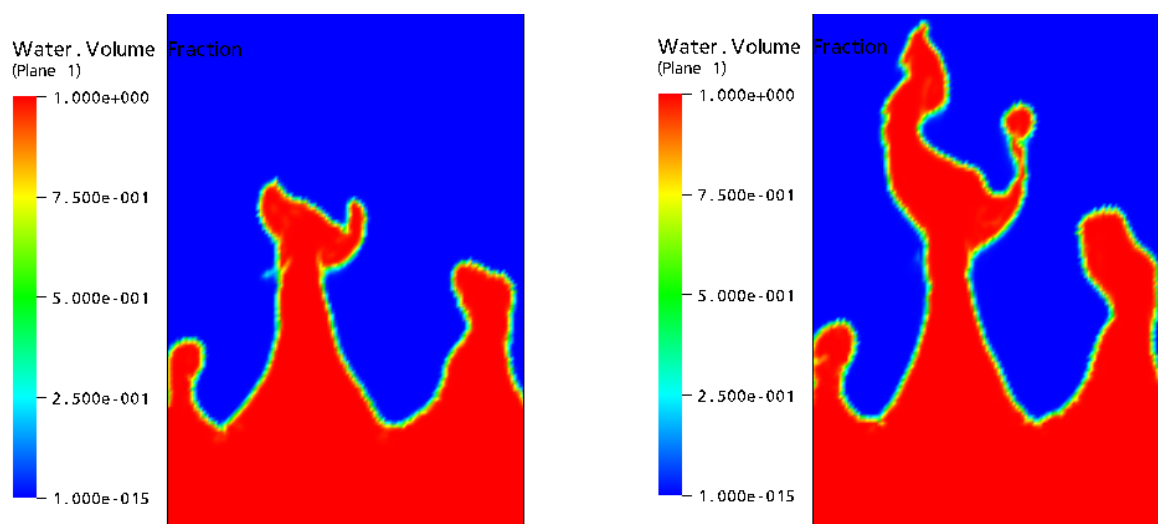


Figura 40 – Resposta para a simulação 1 de 2 experimentos com condições idênticas, tempos de 3,5 e 6,6 s.

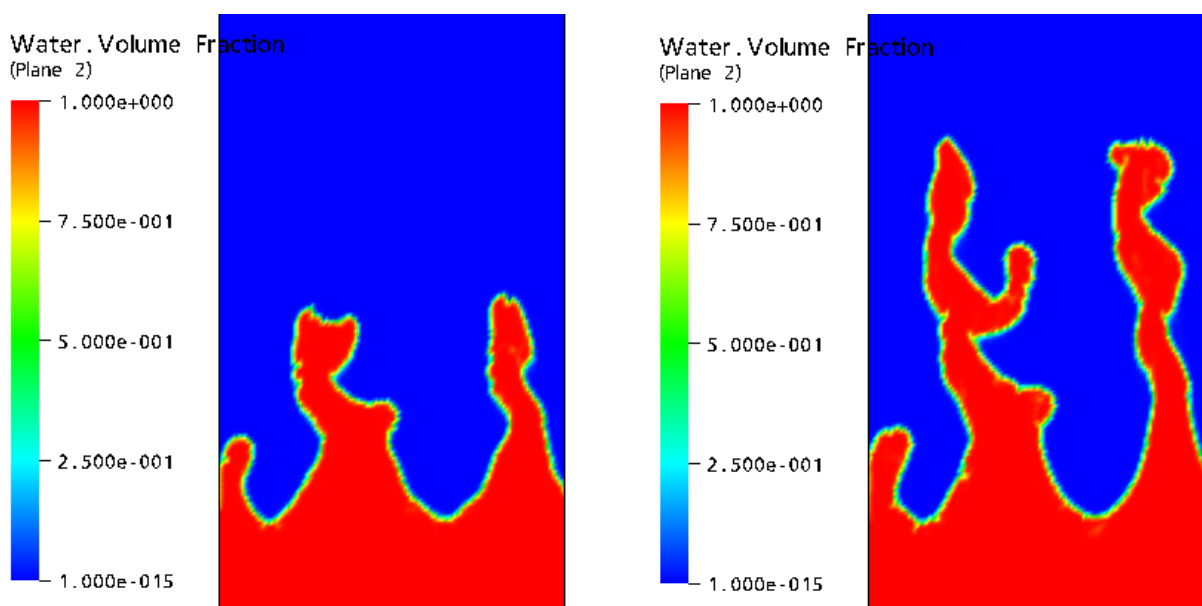


Figura 41 - Resposta para a simulação 2 de 2 experimentos com condições idênticas, tempos de 3,5 e 6,6 s.

Para a verificação do erro numérico, pode-se reduzir a taxa residual, mantendo-se o mesmo passo e forçando um aumento no número de interações para a convergência. Porém com a redução da taxa residual e o aumento do número de “*Timesteps*”, o tempo de simulação pode aumentar muito e os resultados podem ainda não atingir o nível residual desejado. Outra forma de solucionar a questão seria aumentar o número de elementos da malha; o refino da malha, com maior número de pontos de discretização no domínio, possibilita soluções com maior riqueza de detalhes e menor erro devido à difusão numérica. No presente trabalho, tem-se empregado malhas com cerca de 300 mil elementos, que geram tempos de processamento de cerca de duas semanas para alguns segundos de simulação. Portanto, no momento, o aumento da malha é proibitivo, pois aumentaria grandemente a demanda computacional.

Assim, visando otimizar o tempo de processamento computacional com redução do erro numérico, partiu-se para o refino da discretização no tempo, passando-se a realizar várias simulações com diferentes passos de tempo.

O passo de tempo deve se adequar ao refino de malha e geometria do problema. No caso da célula de Hele-Shaw, onde se optou por uma malha hexaédrica extrusada, a maior exigência para a redução do passo provém da geometria do problema, dadas as dimensões da célula: 100 cm para o comprimento, 24 cm para a largura e 0,11 cm para o espaçamento entre placas. Pode-se dizer que as diferenças entre as dimensões são consideráveis. De fato, a canaleta (espaço entre as placas) é de dimensão capilar, resultando ser muito mais sensível a efeitos de erros residuais durante a solução do problema. Portanto, torna-se necessária a redução do passo de tempo a um nível que satisfaça a convergência e o nível de erro residual para um sistema capilar. Considera-se então que a necessidade de redução do passo de tempo para valores de 0,0001s é devida ao reduzido espaçamento entre as placas e pode melhorar a solução sem a necessidade de um refino geral da malha.

Assim, para uma duplicata de simulações com passo de 0,01 foram observadas grandes disparidades entre os resultados de uma e outra. Um erro residual aleatório de processamento paralelo, além do erro de passo de tempo e de interação, são os principais responsáveis pelas disparidades observadas. Constatou-se também que para simulações de casos idênticos a redução do passo de tempo de 0,001 para 0,0005s, acarreta uma redução da taxa de erro residual; mesmo assim, as respostas gráficas e numéricas obtidas são semelhantes. Para passos de tempo mais refinados, como 0,0005 e 0,0001s, as respostas apresentam maior proximidade.



Assim, com a definição de regime laminar, e conseqüente ausência de efeitos de turbulência nas equações matemáticas, verificou-se que a pequena diferença na resposta da perturbação da interface pode ser atribuída ao erro numérico residual, o qual é sensível ao passo de tempo, ou mesmo a erros aleatórios comuns à simulação computacional paralela. Esses erros além de não serem previsíveis e de difícil controle, agravam-se em um sistema quase bidimensional, como o caso da célula de Hele-Shaw, onde a espessura entre as placas é muito menor que a largura e a altura das mesmas, o que exige um passo de tempo consideravelmente pequeno (0,0001s).

As Figura 42 A e B mostram simulações de perturbação inicial da interface para uma tensão interfacial de 0,109 N/m, a um mesmo tempo de simulação (4,0s) e passos  $A = 0,0005$  e  $B = 0,0001$ , respectivamente. De acordo com essas figuras, pode-se observar a tendência do surgimento de três *fingers*, em três porções aproximadamente iguais. A perturbação da interface e a proporção de desenvolvimento dos *fingers* já começam a apresentar alguma semelhança.

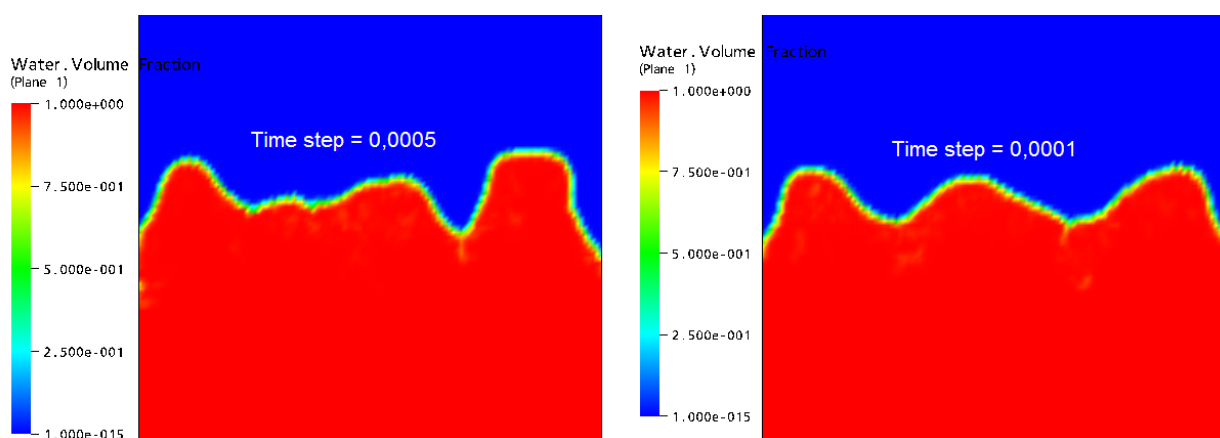


Figura 42 – Perturbação da interface a um momento inicial de simulação, A - passo de tempo de 0,0005; B - passo de tempo de 0,0001.

Duas simulações adicionais, Figura 43, com passos de tempo de 0,0001s e tensão interfacial de 0,10 N/m foram realizadas a fim de confirmar a repetibilidade do resultado. Foi possível obter padrões de escoamento bastante semelhantes para duplicatas de simulações, atendendo, portanto, em parte a repetibilidade esperada para um regime de escoamento laminar. Buscando uma explicação para as diferenças observadas foi feita uma verificação em todas as equações e considerações matemáticas sobre superfície livre e sistema multifásico



presentes no *software*, não tendo sido verificada a existência de um termo que pudesse promover uma aleatoriedade da perturbação da interface.

As Figuras 43 A e B, mostram a perturbação inicial da interface a um mesmo tempo de simulação (3,8s) com uma tensão interfacial de 0,10 N/m e para um passo de tempo de 0,0001s. De acordo com essas figuras, e possivelmente devido à redução no valor da tensão interfacial de 0,0109 para 0,100 N/m, pode-se observar a tendência do surgimento de quatro *fingers*, em quatro porções aproximadamente iguais. A perturbação da interface e a proporção de desenvolvimento dos *fingers* apresentam semelhança.

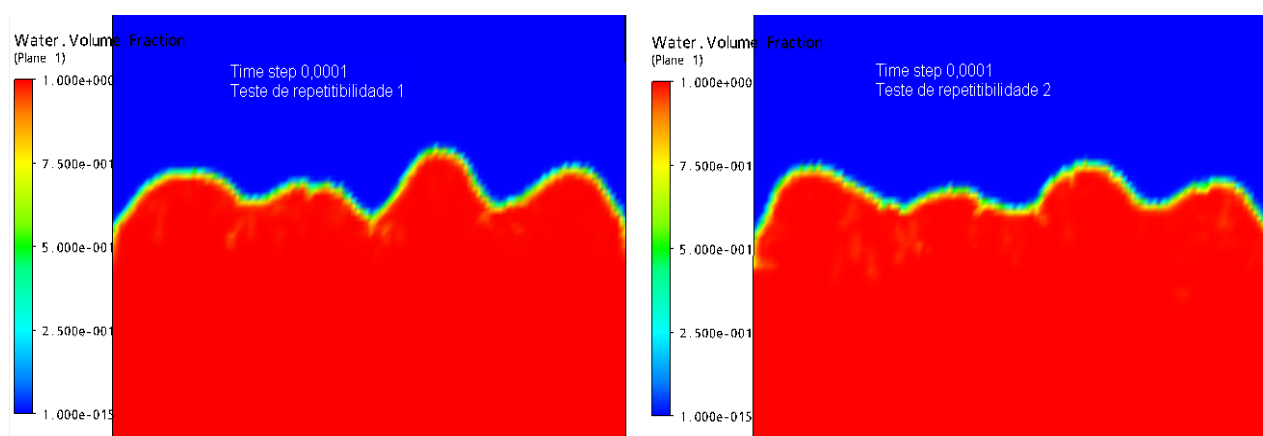


Figura 43 – Teste de repetibilidade, passo de tempo = 0,0001s; tensão interfacial = 0,10 N/m; tempo de simulação 4 segundos. A – Teste de repetibilidade simulação 1; B – Teste de repetibilidade simulação 2.

Comparando ainda o desenvolvimento das simulações com passos de tempo de 0,001 e 0,0001s, conforme Figuras 44 A e B, pode observar diferenças importantes na forma dos *fingers*, além de alteração na cinética da perturbação; para passos de 0,001s a perturbação se estabelece com 5,5s, já com passos de 0,0005 e 0,0001s forma-se em cerca de 6,4s. Mas analisando de forma global, pode-se dizer que a perturbação e resultado final das simulações, seja com passos de 0,001 ou 0,0001s, mantêm a tendência de formação de 3 *fingers* de água igualmente espaçados.

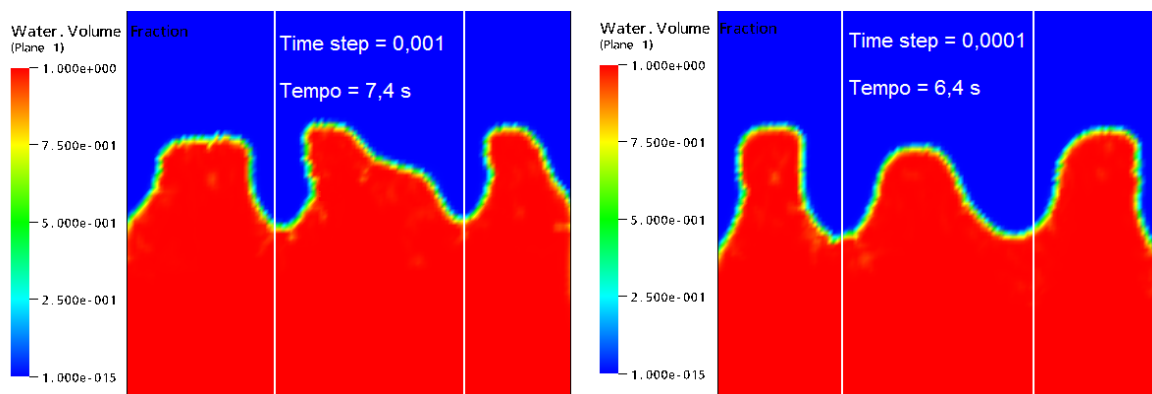


Figura 44 – Perturbação da interface, A - para passo de 0,001s a um tempo de 7,4s; B - para passo de 0,0001s ao tempo correspondente a 6,4.

É perceptível a diferença na forma dos *fingers* apresentados nas Figuras 44 A e B, e mesmo com semelhanças de carácter global, alterações de largura ou comprimento do *finger* afetam diretamente o valor numérico de eficiência do processo de bombeamento, calculado a partir da área de óleo em atraso. Cálculos de área em atraso e eficiência de deslocamento, realizados a partir de simulações com passos de 0,001, 0,0005 e 0,0001s apresentaram grandes diferenças. Buscando atender à validação do modelo, quanto mais próximos estiverem os valores simulados para a área em atraso e de eficiência do processo em relação às medidas experimentais, tanto melhor. Tomando como exemplo o ensaio experimental de número 2 da Tabela 4, as avaliações de simulação para passo de 0,001s, produziram uma área em atraso calculada e eficiência do processo de 224,24 cm<sup>2</sup> e 52,3 %, respectivamente. Já para a simulação com o passo de 0,0001s, tem-se que a área de atraso e eficiência são respectivamente de 305,40 cm<sup>2</sup> e 35,12%. Quando comparados aos valores experimentais obtidos, tem-se 336,59 cm<sup>2</sup> de área em atraso e 28,5% de eficiência. Portanto, percebe-se que para um passo de tempo mais refinado, obtém-se melhor sintonia entre os resultados computacionais e experimentais.

Quando comparadas resposta experimental e simulação computacional com passo de 0,0001s, verifica-se que o número de *fingers* e as características gerais do processo, como tempo para estabelecimento da perturbação, forma e frequência da mesma se aproximam da observação experimental. Outro aspecto acima citado é a confirmação da correta estimativa da área ou volume de óleo em atraso; esse é certamente um dos principais resultados para comparação do modelo de simulação proposto com os resultados obtidos no planejamento experimental. As Figuras 45 e 46 exibem os padrões da digitação viscosa observados

experimentalmente e por simulação e esquematizam o cálculo da área de óleo em atraso para um mesmo instante do processo de bombeamento.

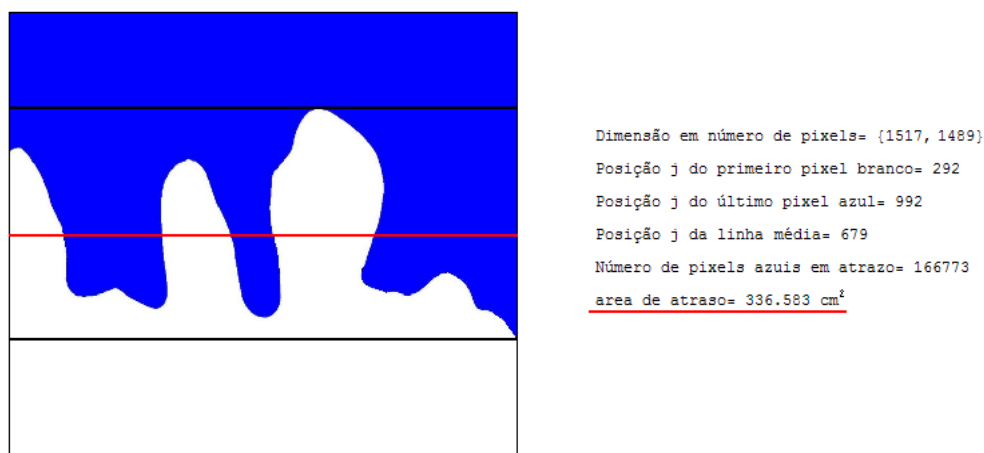


Figura 45 – Esquema do cálculo da área de óleo em atraso para o ensaio 2 da Tabela 4.

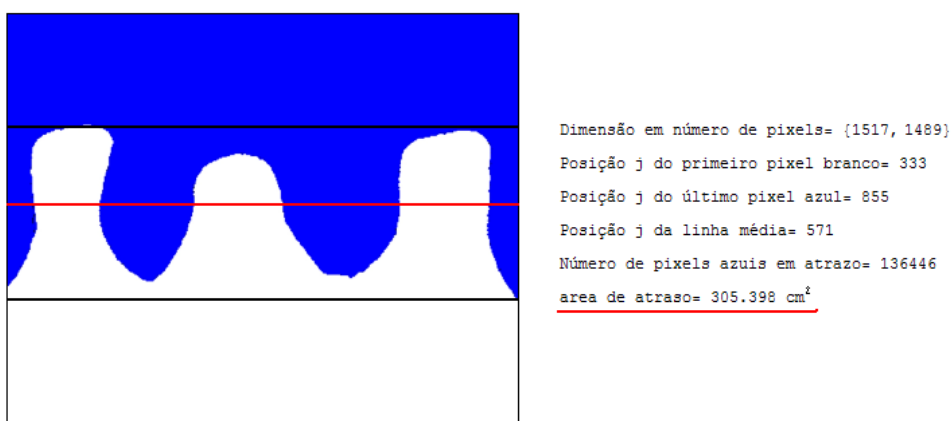


Figura 46 – Esquema do cálculo da área de óleo em atraso para a simulação do ensaio 2 da Tabela 4.

Poderia ainda ser cogitada uma nova redução de uma ordem de grandeza no passo de tempo, passando-se a 0,000001s, mas para se manter a adequada relação entre a discretização temporal e espacial, seria necessário também refinar a malha. Em vista dos resultados obtidos e das limitações quanto ao tempo de processamento, pode-se considerar que o modelo CFD desenvolvido é capaz de representar satisfatoriamente muitos dos aspectos experimentais do processo estudado.

Analisando-se os dados de desvio fornecidos pela análise estatística experimental, pode-se dizer que um mesmo experimento pode apresentar variação de até 10,8 % na resposta da eficiência de bombeamento. A falta de reprodutibilidade nos ensaios experimentais pode estar associada à montagem do equipamento, que é muito delicada, e ao próprio

---

fenômeno de instabilidade interfacial, o qual é extremamente sensível às perturbações do meio e à condição inicial da interface. Assim, pode-se dizer que o resultado da eficiência obtida pela simulação computacional está situado dentro da faixa de variação experimental da eficiência do processo de bombeamento de óleo pela injeção de água. Assim, apesar da necessidade de se continuar aprofundando o estudo dos fenômenos relacionados ao escoamento imiscível de líquidos, julga-se que a abordagem adotada ao longo deste trabalho mostrou-se adequada e enseja desde já a sua aplicação na consideração de inúmeros problemas práticos, notadamente na indústria do petróleo.

## 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O fenômeno de digitação viscosa, assim como as propriedades que envolvem a problemática de escoamento água e óleo, vem sendo estudado a mais de meio século. Pode-se dizer que os campos de ciência e tecnologia, incluindo principalmente áreas de indústria de petróleo e áreas de meio ambiente, se mostram os mais interessados no assunto.

O presente estudo pode ser classificado como um trabalho de pesquisa básica, onde os principais focos envolvem: o estabelecimento de noções básicas sobre as propriedades dos fluidos presentes no sistema; o aprofundamento e análise da importância de cada efeito sobre o fenômeno da digitação viscosa; e o desenvolvimento de modelos matemáticos aptos a reproduzir as observações experimentais, além de servirem como ferramenta preditiva para o projeto e controle de processos envolvendo escoamentos imiscíveis.

Para realização do trabalho, optou-se pela utilização da célula de Hele-Shaw como um modelo físico adequado ao estudo do escoamento imiscível água/óleo. Embora, a situação física correspondente à célula de Hele-Shaw represente uma simplificação para a maioria dos problemas reais, muitos dos elementos essenciais à caracterização de um sistema de deslocamento de fluidos imiscíveis estão presentes. Com isso, a célula de Hele-Shaw se apresenta como um campo de testes válido, sendo que os resultados nela obtidos podem servir como ponto de partida para o enfrentamento e solução de muitas questões práticas.

Através dos experimentos conduzidos na célula de Hele-Shaw foi possível relacionar as propriedades dos fluidos (densidades, viscosidades e tensão interfacial), além de condições operacionais e fenômenos físicos (velocidade de injeção do fluido de bombeamento, capilaridade e força gravitacional), que influenciaram na estabilidade da interface água/óleo e no surgimento do fenômeno de digitação viscosa. Foi possível, estudar a importância de cada fator sobre o sistema, gerando-se subsídios para a posterior tarefa de modelagem. Por exemplo, comprovou-se que o aumento das forças capilares, estas que são condições naturais e específicas de cada reservatório e não podem ser alteradas, costumam levar a um aumento da instabilidade na interface, com conseqüente aumento no número de *fingers* desenvolvidos durante o escoamento, fazendo crescer a área de óleo em atraso e reduzindo a eficiência do processo de bombeamento do óleo através da injeção de água. Comparativamente, a ação da gravidade (ângulo da célula com a horizontal) e a velocidade do escoamento (vazão de injeção) apresentaram menor importância.

---

Para um estudo computacional da célula de *Hele-Shaw*, foi implementado um modelo CFD com propriedades físicas e geométricas tão próximas quanto possível do modelo experimental. Buscou-se definir matematicamente as mesmas condições operacionais testadas experimentalmente. O modelo CFD desenvolvido neste trabalho mostrou-se apto a descrever o experimento de forma realística e com riqueza de detalhes, permitindo testar a sensibilidade de parâmetros físicos e operacionais com respostas adequadas à natureza física do problema. Deste modo, testaram-se o aumento de adesividade nas paredes da célula e variações na tensão interfacial provocadas pela presença de sal na água. Estas variações demonstraram que para os casos estudados, a redução da tensão interfacial do sistema permite obter melhor eficiência na recuperação de óleo. Assim, esse modelo se constitui em uma ferramenta valiosa para estudos fenomenológicos de sistemas de fluidos imiscíveis.

Com base na experiência adquirida, poderia se sugerir, como exemplo de aplicação, um estudo de controle de processo de extração a partir de um reservatório de petróleo, onde a partir de dados do tratamento de imagens obtidas de uma geofísica 2D da região do poço, o modelo computacional possa indicar as necessárias alterações nas condições operacionais, inclusive com mudanças no fluido injetado, visando coibir o desenvolvimento dos *fingers* e aumentar a eficiência de bombeamento.

---

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIRACHAKARAN, S., OGLESBY, K., MALINOWSKI, M., , SHOHAM, O., BRILL, J., *An analysis of oil/water flow phenomena in horizontal pipes*. **Society of Petroleum Engineers**, Paper (8836), 1989.
- ASIMOV, I., *Cómo descubrimos el Petróleo*, Editorial Molino, Barcelona, 1977.
- BAPTISTA, R.M., MACHADO, R.A.F., QUADRI, M.B., NOGUEIRA, A.N., LOPES, T.J., *Mathematical approach to foresee the oil volume leaked from a submarine pipeline in case of accident*. **ASME-IPC04\_0218**, 2004.
- BENTSEN, R.G., *A new approach to instability theory in porous media*. **Society of Petroleum Engineers**, October, p.765-779, 1985.
- BENTSEN, R.G., *The physical origin of interfacial coupling in two-phase flow through porous media*. **Transport Porous Média**, Vol. 44,p.109-122, 1987.
- BRACKBILL, J.U., KOTHE, D.B., ZEMACH, C., *A Continuum Method for Modeling Surface Tension*. **Journal of Computational Physics**, vol. 100, p. 335-354, 1992.
- BRAUNER, N. and ULMANN, A., *Modeling of Phase Inversion Phenomenon in Two-Phase Pipe Flows*. **International Journal of Multiphase Flow**
- BRIAN, F. T., *Fundamental Principles of Reservoir Engineering*. **Society of Petroleum Engineers**, Vol. 8, p.232, 2002.
- BUTTON, S.T. *Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados*. CAMPINAS, 105p, 2005.
- CHRISTIE, M.A., MUGGERIDGE, A.H., BARLEY, J.J., *3D simulation of viscous fingering and wag schemes*. **Society of Petroleum Engineers**, Paper (21238), 1991.
- CHUOKE, R.L., VAN MEURS, R., VAN DER POEL, C., *The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-liquid Displacements in Permeable*. **AIME**, vol. 216, p. 188-194

- 
- COSKUNER, G. AND BENTSEN, R.G., *A modified theory for predicting unstable immiscible displacements*. Aostra, **J of Research**, vol 2, no. 3,155-165, 1986.
- CRAIG JR., F.F., *The reservoir engineering aspects on water-flooding*. Monographic - Society of Petroleum Engineers, Dallas, 1971.
- DICHARRY, C., ARLA, D., SINQUIN, A., GRACIAA, A., BOURIAT, P., *Stability of water/crude oil emulsions based on interfacial dilatational rheology*. **Thermodynamique et Energétique des Fluides Complexes**. December 2005, p.1155
- FIORESE, E.K, *Estudo Experimental e de Modelagem Fluidodinâmica de Sistemas Agua/Óleo*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 92p, 2004.
- FONTES, C.E., SILVA, L.F.L.R., LAGE, P.L.C., RODRIGUES, R.C., *Introdução a Fluidodinâmica Computacional*. Escola Piloto Virtual, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- GADÊLHA, H. A. B, *Efeito da Força de Coriolis na Célula de Hele-Shaw Girante: Estabilidade Linear e Dinâmica Não-Linear*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife,105p, 2007
- GUSTAFSSON B. and VASIL'EV A., *Conformal and Potential Analysis in Hele-Shaw cells*. Stockholm, Valparaíso, 189p, 2004.
- HUMERES, A., *Atualidades de físico-química orgânica*. Traduzido por Eduardo, J. J., Editora Imprensa Universitária, Florianópolis. 549p, 1999.
- LAKE, L. W., *Enhanced oil recovery*. Prentice Hall, New Jersey, 550p, 1989.
- MALISKA, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Ed. LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 2004.
- MAXWORTH, T., *The nonlinear growth of a gravitationally unstable interface in a Hele Shaw cell*. **Journal Fluid Mechanics**, 177, 207-232, 1986.
- MILLER, R. and FAINERMAN, V. B., *Surfactant adsorption layers at liquid-fluid interfaces*. In *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*. Vol. 1, Ed. Academic, São Diego, EUA, 2001.



- 
- MYERS, D., *Surface Interfaces and Colloids Principles and Applications*. USA, VHC Publishers. 1990
- NAKAE, H., INUI, R., HIRATA, Y., SAITO, H. *Effects of surface roughness on wettability*. **Acta materials**, v.46, n.7, p.2313-2318, 1998.
- NG T.S, LAWRENCE C.J., HEWITT G.F., *Interface Shapes for two-Phase Laminar Stratified Flow in a Circular Pipe*. **Internacional Journal of Multiphase Flow**, vol. 27, p.1301-1311, 2002.
- PORTER M. R.; *Recent developments in the analysis of surfactants, Critical reports on applied chemistr.*, N.Y.,Ed. Elsevier Science Ltde, 1978.
- RAITHBY, G. D., *Skew Upstream Differencing Schemes for Problems Involving Fluid Flow*. **Computational Meth. Applied Mech. Eng.** vol. 9, pg 153-164, 1976.
- REIS J. C., *Environmental Control in Petroleum Engeneering*. Ed. Gulf Publishing Company, Houston, 1996.
- MACHADO, R. A. F., BAPTISTA, R. M., QUADRI, M. B., BOLZAN, A., MARIANO, G. C., NOGUEIRA, A. L., LOPES, T. J., *Experimental Study of Oil Leakages Applied to Submarine Pipelines*. IBP1443\_07, **Rio Pileline Conference & Exposition 2007**
- ROSEN, M. J., *Surfactants and interfacial phenomena*. Ed. Wiley ,Interscience, New York, 1978.
- ROTUREAU E., LEONARD M., DELLACHERIE E., DURAND A., *Amphiphilic derivatives of dextran: Adsorption at air/water and oil/water interfaces*. **Group Ensic**, p. 451 – 455, 2004.
- SHAW, D. J., *Introdução à Química dos Colóides e de Superfícies*. tradução Juergen Hunrech Maar, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo - 1975.
- SAFFMAN, P.G.; TAYLOR, G.I., *The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid*. **Proc. Roy. Soc.**, A245, p. 312-329, 1958.
- SAGHIR, M.Z., CHAALAL, O., ISLAM, M.R., *Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid miscible displacement*. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Vol.26, p.253-262, 2000.

- 
- SANTOS, R G., *Avaliação da molhabilidade de superfícies de oleodutos através de medidas de ângulo de contato: Efeito de asfaltenos e de ácidos naftênicos*. Dissertação (Mestrado), São Paulo, 105p. 2003.
- SHAW, D. J. *Introduction to colloid and surface chemistry*. Reed Education and Professional Publishing Ltd, Oxford, 306p, 1992.
- SILVA, M. K., *Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido*. Dissertação (Mestrado), Florianópolis, 91p. 2006
- SILVIA R. P., *Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicações em Projetos de Separadores Gravitacionais*. Dissertação (Mestrado), São Paulo, 143p, 2004.
- TCHELEPI, H.A., ORR, F.M., RAKOTOMALALA, N., SALIN, D., WOURMENI, R., *Dispersion, permeability heterogeneity, and viscous fingering: acoustic experimental observations and particle-tracking simulations*. **Journal Phys. Fluids A** 5 \_7, 1993
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Interciência, Rio de Janeiro, p.200-207, 2001.
- TRALLERO, J., SARICA, C., BRILL, J., *A study of oil-water flow patterns in horizontal pipes*. **Society of Petroleum Engineers**, Paper (36609), 1996.
- TRYGGVASON, G. and AREF,H., *Numerical experiments on Hele Shaw flow with a sharp interface*. **Journal of Fluid Mechanics**, 136, 1-30, 1983.
- TRYGGVASON,G. and AREF,H., *Fingers-interaction mechanisms in stratified Hele Shaw flow*. **Journal of Fluid Mechanics**, 287-301, 1984.
- TURNER, A. H. and HOUSTON, J. H., *The market for industrial surfactants in the 1990s—an overview*. In *Industrial Applications of surfactants*. Vol. 3; Tradução: Karsa, D. R., Ed.; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, RU, 1992.
- VOSSOUGH, S., SMITH, J.E., GREEN, D.W., WILLHITE, G.P., *A new method to simulate the effects of viscous fingering on miscible displacement processes in porous media*. **Society of Petroleum Engineers**, J.24,56–64. 1984.

---

YAHYA, G. O., ASROF ALI, S. K., AL-NAAFA, M. A., HAMAD, E. Z. J., **Appl. Polym. Sci.**, Vol 57, p.343 (1995).

ZIMMERMAN, W.B. and HOMSY, G.M., *Three-dimensional viscous fingering: a numerical study*. **Phys. Fluids A** 4 \_9.1992.

ZISMAN, W. A., *Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. In: Contact angle, wettability and adhesion*. **American Chemical Society**. Advances in chemistry series 43, p.1-51, 1964.

## **ANEXOS**

Neste anexo à Dissertação, destacam-se importantes publicações e trabalhos realizados pelo grupo do Laboratório de Controle de Processos do curso de pós-graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Santa Catarina. São apresentadas publicações referentes às atividades de 2 projetos financiados pela FINEP / Cenpes Petrobrás, onde o autor da dissertação Gabriel Cassemiro Mariano participou ativamente e desenvolveu seu objeto de estudo.

Dentre os 2 projetos tem-se:

- O estudo do sistema multifásico água / óleo aplicado ao vazamento de dutos submersos (Migração Advectiva).
- O desenvolvimento de um software e modelo matemático utilizado para predição de vazamento de óleo, possibilitando a quantificação segura de um desastre ambiental.

É válido destacar também a publicação de 1 capítulo de livro internacional e 1 artigo em revista também classificada como internacional, além da participação em diversos congressos nacionais e internacionais.

Abaixo, apresentam-se as referências das publicações concluídas, e em seguida os dois trabalhos que tiveram maior repercussão durante a realização da pós-graduação nível mestrado.

#### CAPÍTULOS EM LIVROS PUBLICADOS:

BAPTISTA, R. M. ; QUADRI, M. B. ; MACHADO, R. A. F. ; BOLZAN, A. ; NOGUEIRA, A. L. ; LOPES, T. J. ; [MARIANO, G. C.](#). *Effective Interfacial Tension and Geometrical Parameters Relationship for The Description of Oil Leakages from Submarine Pipelines*. Selected papers of The Eight Italian Conference on Chemical and Process Engineering. 1 ed. Milão: Reed Business Information S.p.a., 2007, v. 8, p. 9-18.

#### ARTIGO COMPLETO EM PERIÓDICOS:

[MARIANO, G. C.](#) ; CARDOSO, F.F. ; LOPES, T. J. ; NOGUEIRA, A. L. ; BAPTISTA, R. M. ; QUADRI, M. G. N. ; MACHADO, R. A. F. ; QUADRI, M. B.. *Um Estudo Experimental sobre a Instabilidade da Interface no Deslocamento de Óleo por Injeção de Água*. **Petro & Química**, v. 299, p. 1-8, 2007.

---

**CONGRESSOS:**

[MARIANO, G. C.](#); QUADRI, M. B.; LOPES, T. J.; CARDOSO, F.F.; MACHADO, R. A. F.; QUADRI, M. G. N.. *Um Estudo Experimental sobre a Instabilidade da Interface no Deslocamento de Óleo por Injeção de Água*. In: **4º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás**, 2007, Campinas. 4º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás.

MACHADO, R. A. F.; BAPTISTA, R. M.; QUADRI, M. B.; BOLZAN, A.; [MARIANO, G. C.](#); NOGUEIRA, A. L.; LOPES, T. J.. *Experimental Study of Oil Leakages Applied to Submarine Pipelines*. In: **Rio Pipeline**, 2007, Rio de Janeiro. Rio Pipeline Proceedings, 2007. p. 1-8.

BAPTISTA, R. M. ; QUADRI, M. B. ; MACHADO, R. A. F. ; BOLZAN, A. ; NOGUEIRA, A. L. ; [MARIANO, G. C.](#) ; LOPES, T. J. . *Effective Interfacial Tension and Geometrical Parameters Relationship for the Description of Oil Leakages from Submarine Pipelines*. In: **8º International Conference on Chemical & Process Engineering**, 2007, Napolis. 8º International Conference on Chemical & Process Engineering. Milano : AIDIC Servizi S.r.l, 2007. v. 11. p. 401-406.